

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.

PAR
STEEVE MONTMINY

CONCEPTION D'UN ROBOT SAUTEUR DÉDIÉ À L'EXPLORATION PLANÉTAIRE ET
UTILISANT LES FLUCTUATIONS DE TEMPÉRATURE QUOTIDIENNES COMME
SOURCE DE PUISSANCE

MONTREAL, LE 7 JUIN 2006

© droits réservés de Steeve Montminy

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Henri Champliand, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Erick Dupuis, codirecteur de mémoire
Agence spatiale canadienne à Saint-Hubert

M. Louis Lamarche, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Vladimir Brailovski, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 24 JUILLET 2006
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

CONCEPTION D'UN ROBOT SAUTEUR DÉDIÉ À L'EXPLORATION PLANÉTAIRE ET UTILISANT LES FLUCTUATIONS DE TEMPÉRATURE QUOTIDIENNES COMME SOURCE DE PUISSANCE

Steeve Montminy

SOMMAIRE

L'intérêt porté par les agences spatiales du monde entier à l'exploration planétaire a grandement augmenté au cours de la dernière décennie. Par contre, les coûts reliés à ce genre de mission sont très élevés et il est difficile pour plusieurs agences spatiales d'y participer étant donné l'absence de fonds suffisants pour financer les mégas missions auxquelles la NASA nous a habitués. C'est pour cette raison que l'agence spatiale canadienne a décidé d'explorer la faisabilité de micromissions d'exploration planétaire. Le Canada voit dans ces missions de moins grandes envergures, une façon de participer plus activement à l'exploration d'autres planètes tout en réduisant les coûts qui y sont associés et en faisant une contribution complémentaire aux autres programmes internationaux.

Le présent ouvrage traite de la conception mécanique d'un prototype de robot sauteur destiné à l'exploration de planètes ayant un environnement gravitationnel faible (Mars, par exemple). Ce robot utilise les variations de température à la surface de Mars comme source d'énergie. Pour ce faire, une approche systématique a été préconisée en établissant un cahier de charge. Par la suite, une recherche a été faite sur ce sujet et différents concepts potentiels ont été évalués. Les différents sous-systèmes, en commençant par ceux qui ont le plus d'impact sur la conception finale, ont été décortiqués. Les mécanismes les plus importants ou ceux étant considérés comme étant les plus risqués ont été fabriqués et mis à l'essai avant de poursuivre la conception des autres éléments.

Les principaux mécanismes nécessaires à la locomotion du robot ainsi que les pièces agissant à titre structurel ont donc été conçus. Un mécanisme "innovateur" à ciseaux cylindrique servant à transférer l'énergie nécessaire au saut a été conçu, fabriqué et testé. De plus, un actionneur à alliage à mémoire de forme (AMF) fonctionnant avec la chaleur du soleil a été conçu et un prototype de ce dernier a été mis à l'essai. Le concept de robot présente les caractéristiques suivantes : un seul et unique actionneur sert à emmagasiner l'énergie nécessaire au saut et à repositionner le robot sur ses pieds après l'exécution d'un saut. La structure du robot, en forme de tétraèdre, s'insère dans une enveloppe cubique de 300 mm de côté ce qui lui confère le statut de microrobot. Le concept proposé tire avantage de l'environnement martien. En effet, la faible gravité et la faible densité atmosphérique favorisent le saut comme moyen de locomotion, alors que le gradient de température (jour versus nuit) élevé à la surface de Mars favorise l'élongation de l'actionneur AMF. L'action de sauter permet au robot de s'aventurer en terrain très accidenté en sautant par-dessus les obstacles.

Ce mémoire, basé sur un développement expérimental, présente les éléments importants d'une conception mécanique préliminaire sans toutefois couvrir tous les aspects qu'une conception complète et finale nécessiterait. En effet, pour faire suite à ce travail, il faudrait approfondir les analyses structurelles validant que tous les éléments tolèrent l'impact à l'atterrissage. Il faudrait vérifier l'effet des distorsions thermo-élastiques dans les mécanismes, simuler, de façon plus précise, la friction dans les joints, et procéder à une optimisation de la structure afin de réduire la masse totale du système.

DESIGN OF A HOPPER ROBOT FOR PLANETARY EXPLORATION USING DAILY FLUCTUATIONS OF TEMPERATURE AS A SOURCE OF ENERGY

Steeve Montminy

ABSTRACT

Planetary exploration is as much a current subject for agencies directly dealing in space as well as for the general public. However, the costs related to this type of mission are extremely steep and many space agencies attempt to participate without having the means to finance megamissions to which past missions have accustomed us. Hence, it is mainly for this reason that the Canadian Space Agency (CSA) has decided to turn to micromissions. Canada sees in these less elaborate missions, an opportunity to more actively engage in the discovery of other planets while reducing costs.

The present work deals with mechanical design of a hopping robot prototype destined to the exploration of planets with a low gravitational environment (Mars for instance). This robot uses extensive variations of temperature at Mars' surface as a source of energy. In order to do this, we proceeded in a systematic approach by establishing design requirements. Furthermore, a state-of-the-art study was done on the subject and assessed various potentials concepts. Once the most promising concept was established, the different sub-systems were dissected in minute detail and development started with those which had the most impact on the final design. The most risky or important mechanisms were manufactured and tested prior to continuing the design of the other elements.

We have thus designed the main mechanisms required to the locomotion of the robot as well as the structural parts. An "innovative" cylindrical mechanism with scissors used to transfer the energy needed by the robot's jump was designed, manufactured and tested. Moreover, an actuator with shape memory alloy (SMA's) working with the sun's heat was designed, while a prototype was tested. The robot's design shows the following characteristics: a unique actuator is used to load the energy needed for the jump into torsion springs and to reposition the robot back on its feet after having hopped. The robot's structure, in the shape of tetrahedron, is confined into a 300 mm edge lengthen cubic envelop which corresponds to a status of "micro" robot. The proposed concept takes advantage of the Martian environment. In fact, the low gravity and the low atmospheric density favors the jump as a means of locomotion, while the important gradient of temperature (day versus night) at the surface of Mars enables the elongation of the SMA. Consequently, jumping lets us cover longer distances while crossing the numerous rocks that cover the hazardous surface of Mars.

This thesis, based on experimental development, covers the important elements of a preliminary mechanical design without, however, dealing with the aspects that a final and complete design would need. Thus, to pursue this work, one should look closer into the structural analysis to verify how all elements can tolerate the impact upon landing. One should also verify the effect of thermo-elastic distortion in the mechanisms and

simulate more precisely the friction in the joints and optimize the whole structure to reduce the total mass of the system.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout spécialement à remercier mon directeur de maîtrise, M. Henri Champlaud Ph.D., ainsi que mon codirecteur M. Erick Dupuis Ph.D., pour leur rigueur et l'aide technique qu'ils m'ont apportée tout au long de la présente recherche. Je veux aussi remercier mes collègues et amis; Mo Farhat, Pierre Lortie, Philippe Vincent et Ralph Nolting, sans qui ce projet n'aurait pas été construit.

Cette réalisation n'aurait pu être possible sans l'appui inégalé de mes parents, Réjean et Micheline. Je veux vous remercier pour vos encouragements soutenus tout au long de mes études et surtout, pour tout ce que vous m'avez inculqué au fil des années.

Je dédie ce mémoire à ma chère Stéphanie et notre merveilleux petit garçon qu'elle porte en elle. Merci pour ta compréhension et ton aide si généreusement apportées durant cette année de rédaction. Aucune autre personne que toi n'aurait pu si bien me comprendre, m'entourer et me conseiller.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES GRAPHIQUES.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	xiv
INTRODUCTION	16
CHAPITRE 1 DÉFINITION DU PROBLÈME.....	18
1.1 Contexte	18
1.2 Problématique.....	23
1.3 Définition du cahier des charges et des concepts fondamentaux de conception.....	26
1.3.1 Général.....	26
1.3.2 Description des prérequis et spécifications imposées	27
1.3.3 Stratégie de locomotion.....	29
1.3.4 Description des spécifications dérivées.....	32
1.3.5 Définition de la charge utile (Payload)	35
1.4 Objectifs.....	37
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	39
2.1 Véhicules habités.....	39
2.2 Robots non-habités de type "sauteurs"	40
2.3 Robots hybrides	55
2.4 Alliage à mémoire de forme appliqué aux actionneurs	59
CHAPITRE 3 ANALYSES.....	62
3.1 Définition.....	62
3.2 Calcul de la trajectoire balistique et analyse énergétique du système	62
CHAPITRE 4 DISCUSSION SUR LES DIFFÉRENTS CONCEPTS POTENTIELS...69	
4.1 Général	69
4.2 Ressort linéaire	69
4.3 Mécanisme à ciseaux rectangulaires.....	71
4.4 Propulsion à gaz	73
4.5 Mécanisme à quatre (4) barres rigides.....	73
4.6 Mécanisme à ciseaux cylindrique.....	75
4.7 Discussion sur les actionneurs.....	77

CHAPITRE 5	CONCEPTION DU MÉCANISME "SAUTEUR" PRINCIPAL.....	78
5.1	Général	78
5.2	Conception et description.....	78
5.3	Analyse dynamique du mécanisme.....	88
5.4	Discussions et résultats.....	96
CHAPITRE 6	CONCEPTION DE L'ACTIONNEUR À ALLIAGE À MÉMOIRE DE FORME (AMF)	98
6.1	Général	98
6.2	Conception et description.....	100
CHAPITRE 7	CONCEPTION DU SYSTÈME DE REDRESSEMENT	115
7.1	Général	115
7.2	Conception détaillée et explications	116
7.2.1	Structure primaire (châssis)	116
7.2.2	Système de pétales et fonctionnalités	118
CHAPITRE 8	CONCEPTION DES SOUS-SYSTÈMES ET MÉCANISMES SECONDAIRES ET SÉQUENCE.....	130
8.1	Général	130
8.2	Conception et description.....	131
CHAPITRE 9	CONCEPTION DU SYSTÈME DE REPOSITIONNEMENT.....	146
9.1	Général	146
9.2	Système de positionnement "passif" rétractable.....	146
9.3	Système de positionnement "actif" rétractable	147
CHAPITRE 10	DISCUSSION, PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION	149
ANNEXE 1	Étude sur les roches recouvrant la planète Mars.....	153
ANNEXE 2	L'étude du saut (analogie linéaire).....	156
ANNEXE 3	Dessins et informations reliés à la fabrication du robot.....	166
Tableau I	Résumé des prérequis de conception	29
Tableau II	Étude comparative entre les "nanorovers" et les robots "sauteurs"	53
Tableau III	Séquence des opérations du robot sauteur	130
BIBLIOGRAPHIE	184

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Neil Armstrong marchant à la surface de la Lune	18
Figure 2	"PATHFINDER" incluant l'atterrisseur "Carl Sagan" et le robot "SOJOURNER"	20
Figure 3	Le robot (rover) américain "SOJOURNER"	20
Figure 4	Le robot américain "OPPORTUNITY" peu après son arrivée sur Mars ...	21
Figure 5	Représentation d'artiste de "Phoenix Lander" à la surface de Mars	22
Figure 6	Planètes telluriques à l'intérieur du système solaire	23
Figure 7	Image prise par le robot américain "SPIRIT" et montrant le terrain accidenté	26
Figure 8	Enveloppe géométrique du robot "SOJOURNER" comparativement au prérequis de la présente recherche	27
Figure 9	Robobug (National Geographic)	30
Figure 10	Robot rampant "snakerobot" (Carnegie mellon)	30
Figure 11	Comparaison du champs d'action de plusieurs "nanorobots" communiquant entre eux versus un seul	32
Figure 12	Image du sol prise à la lumière	36
Figure 13	Même image que celle de gauche prise à l'aide d'un éclairage UV	36
Figure 14	Image de synthèse prise par un système SIP	37
Figure 15	Réplique d'artiste du "Moon car", tel que pensé par Hermann Oberth en 1959 (Mars institute)	39
Figure 16	Robot sauteur "unijambiste" 3D développé par Marc Raibert	40
Figure 17	Vues d'assemblage du système étudié par Rad et al	41
Figure 18	Patte télescopique de Raibert utilisant un ressort de compression	42
Figure 19	Patte télescopique de Raibert modifiée utilisant un ressort de tension	43
Figure 20	Mécanisme à quatre barres rigides (four-bar linkage) de Chebychev avec ressort de traction	44
Figure 21	Mécanisme de traction retenu par V.K. Papantoniou	45
Figure 22	Mécanisme de Peaucellier datant de 1873	45
Figure 23	Saut vertical humain et mouvements des bras	46
Figure 24	Schéma du robot Stumpy (R. Hayashi et al.)	46
Figure 25	Prototype du robot "BOW LEG" planaire	47

Figure 26	Prototype du robot "BOW LEG" opérant en 3 dimensions	47
Figure 27	Première génération du robot sauteur (Hopbot) développé par JPL	48
Figure 28	Mécanisme à barres rigides et ressort combinés de la deuxième génération (adapté de JPL)	51
Figure 29	Deuxième génération de robot "sauteur" (Frogbot) du JPL	51
Figure 30	Robot sauteur à gaz développé par les laboratoires Sandia	54
Figure 31	Prototype de robot sauteur muni d'un piston et d'une chambre de combustion (Sandia Laboratories)	55
Figure 32	Robot SCOUT développé par DARPA	56
Figure 33	Robot SCOUT : Deuxième génération (DARPA)	56
Figure 34	Schéma montrant un concept de microrobot basé sur la biologie des insectes (CWRU)	57
Figure 35	Représentation et analogie mécanique de la patte de S. Hyon	58
Figure 36	Modèle physique de la patte articulée de S. Hyon (Emura Lab)	59
Figure 37	Actionneur à alliage à mémoire de forme (AMF) développé par Kuribayashi	60
Figure 38	Concept de robot muni d'un ressort linéaire	70
Figure 39	Concept de mécanisme "sauteur" à ciseau rectangulaire	72
Figure 40	Concept de mécanisme "sauteur" à ciseau rectangulaire déployé	72
Figure 41	Concept étudié d'un mécanisme "sauteur" à quatre barres rigides et ressorts	74
Figure 42	Concept potentiel de mécanisme "sauteur" à ciseaux cylindrique	76
Figure 43	Différenciation du mécanisme à ciseaux rectangulaire classique et le concept cylindrique retenu	79
Figure 44	Vue de dessus du mécanisme muni d'un seul ciseau déployé	80
Figure 45	Définition géométrique des membrures de ciseaux	81
Figure 46	Trois membrures (cylindriques) assemblées sur la base du mécanisme à ciseaux	81
Figure 47	Membrures attachées aux deux extrémités (plateaux) du mécanisme	82
Figure 48	Différents aspects importants à considérer dans la conception des membrures de ciseaux	83
Figure 49	Assemblage de membrures formant un ciseau	84
Figure 50	Photographies du prototype final de mécanisme à ciseaux cylindrique	85
Figure 51	Mécanisme à ciseaux cylindrique assemblé	85

Figure 52	Vue de dessus du mécanisme à ciseaux cylindrique	86
Figure 53	Joint universel (rotule) reliant les membrures aux plateaux	87
Figure 54	Dimensions générales du mécanisme à ciseaux cylindrique	90
Figure 55	Environnement de MSC Dynamic Designer pro®	92
Figure 56	Environnement de simulation: mécanisme à l'instant du décollage.....	95
Figure 57	Environnement de simulation (fenêtre des paramètres régissant le ressort)	95
Figure 58	Diagramme montrant les principaux éléments faisant partie d'un système utilisant la chaleur comme source d'énergie	98
Figure 59	Propriétés des alliages à mémoire de forme.....	99
Figure 60	Vue isométrique du mécanisme "sauteur" principal	100
Figure 61	Vue de côté du mécanisme "sauteur"	100
Figure 62	Schéma simplifié d'un actionneur AMF linéaire.....	101
Figure 63	Concept d'actionneur AMF accumulant l'énergie et basé sur plusieurs cycles de températures	102
Figure 64	Propriétés mécaniques des fils AMF pour différents diamètres.....	108
Figure 65	Modèle 3D du prototype d'actionneur AMF conçu	110
Figure 66	Vue de dessus du prototype d'actionneur AMF avec dimensions	112
Figure 67	Photographie de l'actionneur AMF prise pendant les essais	114
Figure 68	Image montrant les pétales et leurs mécanismes de déploiements sur la structure primaire (pyramide)	115
Figure 69	Schématisation du mécanisme "sauteur" intégré dans la pyramide de 350 mm de côté.....	116
Figure 70	Mécanisme à ciseaux cylindrique attaché à l'intérieur de la structure ...	117
Figure 71	Vue d'élévation du robot sauteur avec un des pétales ouverts	119
Figure 72	Positionnement de la pyramide par rapport au mécanisme principal	119
Figure 73	Vue de dessus montrant l'intérieur du robot sauteur.....	120
Figure 74	Plateau intermédiaire supérieur et profil de mouvement suivi par les assemblages de poulies	122
Figure 75	Plateau de fixation et rainure servant de guide aux assemblages de poulies.....	122
Figure 76	Schéma expliquant le système de traction pour l'ouverture des pétales	123
Figure 77	Principales forces régissant le redressement du robot sauteur	123

Figure 78	Diagramme des forces et distances utilisées pour les calculs relatifs au redressement	124
Figure 79	Redistribution des forces dans les cordes de tractions du système	126
Figure 80	Diagramme des forces agissant sur les assemblages de poulies sous l'action du fil AMF	127
Figure 81	Vue de dessus du mécanisme servant à accumuler l'énergie pour propulser le robot.....	132
Figure 82	Analogie linéaire du robot sauteur et représentation des pièces principales	133
Figure 83	Analogie linéaire : Configuration à la suite d'un saut.....	133
Figure 84	Analogie linéaire : Déplacement de l'AMF sous l'effet du refroidissement de température	134
Figure 85	Analogie linéaire : Actionneur AMF à l'état nominal (non déformé)	134
Figure 86	Analogie linéaire : Recharge du ressort principal sous l'effet d'un réchauffement de température.....	135
Figure 87	Analogie linéaire : Énergie entièrement accumulée dans le ressort principal.....	136
Figure 88	Analogie linéaire : Pied sauteur complètement déployé.....	136
Figure 89	Analogie linéaire : Retour du pied sauteur sous l'effet du ressort de rappel	137
Figure 90	Représentation et disposition des plateaux circulaires "prêts" pour le déploiement du mécanisme principal.....	138
Figure 91	Mouvements relatifs des plateaux pendant le déploiement du mécanisme	139
Figure 92	Mouvements relatifs des plateaux et amorce de la rétraction du mécanisme principal.....	139
Figure 93	Configuration des plateaux pendant le saut.....	140
Figure 94	Configuration des plateaux immédiatement avant le déploiement du mécanisme "sauteur" principal.....	140
Figure 95	Sens de rotation du plateau intermédiaire et position des assemblages de poulies	141
Figure 96	Verrou eclipsable (vue détaillée).....	141
Figure 97	Fonctionnement du système de recharge du ressort principal via le	142
Figure 98	Assemblage du tambour de l'actionneur AMF et son verrou servant à la transmission du mouvement	143
Figure 99	Assemblage, par superposition, des plateaux rotatifs	144

Figure 100	Schéma d'un robot sauteur muni d'un pied de redressement.....	147
Figure 101	Schéma d'un robot sauteur muni d'un dispositif d'orientation "actif"	148

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1	Variation de la température locale à la surface de Mars	24
Graphique 2	Courbe de poussée en fonction du temps pour la première génération	52
Graphique 3	Courbe de poussée en fonction du temps pour la deuxième génération	52
Graphique 4	Trajectoire balistique du robot (portée= 3 mètres et $\alpha = 45^\circ$)	65
Graphique 5	Trajectoire balistique du robot (Hauteur atteinte= 1 mètre et $\alpha = 45^\circ$) ...	66
Graphique 6	Trajectoire balistique du robot.....	67
Graphique 7	Évolution de la force (N) produite par le ressort en fonction du temps (secondes)	71
Graphique 8	Énergie cinétique (N-mm) en fonction du temps	94
Graphique 9	Vitesse du centre de masse du robot (mm/s) en fonction du temps	94
Graphique 10	Accélération du centre de masse (mm/s^2) du robot en fonction du temps	96
Graphique 11	Courbe typique des forces et déformations de l'actionneur AMF	103
Graphique 12	Couple nécessaire (Nm) pour redresser le robot sauteur.....	128

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

a	Accélération (m/s^2)
A	Section (mm^2)
A_F	Section du fil AMF (m^2)
AMF	Alliage à mémoire de forme
ASC	Agence spatiale canadienne
β_f	Angle de déformation du ressort principal au décollage (rad)
β_i	Angle de déformation du ressort principal au repos (rad)
B_R	Déformation initiale du ressort de rappel de l'actionneur AMF (m)
CNES	Centre national d'études spatiales
CWRU	Case Western Reserve University
CSA	Canadian Space Agency
D	Diamètre effectif du ressort AMF (mm)
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
Δ	Augmentation de la distance (m)
$\Delta\theta$	Angle de compression initial (degrés)
Δy	Course maximale permise du mécanisme principal (mm)
D_F	Diamètre du fil AMF (m)
D_{FM}	Diamètre maximum permis du fil AMF (m)
ϵ	Élongation totale du fil AMF (mm)
E	Énergie (joules)
EMF	Effet de mémoire de forme
ESA	European Space Agency
F_B	Force initiale de rappel de l'actionneur AMF (m)
F_C	Force de l'accumulateur (N)
F_F	Force de tension maximale appliquée par le fil AMF (N)
F_{FD}	Force dans le fil AMF droit (N)
F_R	Force dans le ressort (N)
F_{RH}	Force dans le ressort AMF (N)
F_{RP}	Force dans le ressort de rappel (N)

g	Accélération gravitationnelle (m/s^2)
JPL	Jet Propulsion Laboratory
k	Raideur de ressort (N/m)
K_R	Raideur du ressort de rappel de l'actionneur AMF (Nm/rad)
L_F	Longueur du fil AMF (m)
MEMS	Micro Electro-Mechanical System
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Ni	Nickel
r_H	Rayon de l'arbre de charnière (m)
r_T	Rayon du tambour (m)
S	Contrainte de déformation maximale permise (MPa)
SMA	Shape Memory Alloy
T_C	Tension dans le câble de traction (N)
θ	Angle d'attaque (degrés)
Ti	Titane
T_H	Couple généré par la charnière (Nm)
v_0	Vitesse initiale (m/s)
v_{x0}	Vitesse initiale suivant l'axe horizontal (m/s)
v_{y0}	Vitesse initiale suivant l'axe vertical (m/s)
ω	Fréquence (rad/s)
W	Travail mécanique (J)
x_0	Distance initiale horizontale (m)
y_0	Distance initiale verticale (m)
y_{Max}	Hauteur maximale atteinte verticalement par le robot (m)

INTRODUCTION

Le présent ouvrage traite de la conception mécanique préliminaire d'un prototype de robot sauteur destiné à l'exploration de planètes ayant un environnement gravitationnel faible tel que Mars par exemple. Ce robot utilise les variations de température à la surface martienne comme source d'énergie. Pour réaliser cette conception, une approche systématique a été suivie en établissant tout d'abord, un cahier des charges. Par la suite, les différents sous-systèmes ont été décortiqués, en commençant par ceux qui avaient le plus d'influence sur la conception finale. Les mécanismes principaux considérés comme étant les plus importants ou risqués ont été fabriqués et testés avant de poursuivre la conception des autres éléments.

Ces sous-systèmes comportent, entre autres, les mécanismes nécessaires à la locomotion du robot ainsi que les pièces agissant à titre structurel. Un mécanisme "innovateur" à ciseaux cylindrique servant à transférer l'énergie nécessaire au saut a été conçu, fabriqué et mis à l'essai. De plus, un actionneur à alliage à mémoire de forme (AMF) fonctionnant avec la chaleur du soleil a été conçu et un prototype de ce dernier a été mis à l'essai. Le concept de robot présente les caractéristiques suivantes : un seul et unique actionneur sert à emmagasiner l'énergie nécessaire au saut et à redresser le robot afin de le remettre sur son pied après l'exécution d'un saut. La structure du robot, en forme de tétraèdre, s'insère dans une enveloppe cubique de 300 mm de côté ce qui lui confère le statut de microrobot. Le concept proposé tire avantage de l'environnement martien. En effet, la faible gravité et la faible densité atmosphérique favorisent le saut comme moyen de locomotion, alors que le gradient de température (jour versus nuit) élevé à la surface de Mars favorise l'élongation de l'actionneur AMF. Pour finir, l'action de sauter permet au robot de s'aventurer en terrain très accidenté en sautant par-dessus les obstacles.

Ce mémoire, basé sur un développement expérimental, présente les éléments importants d'une conception mécanique préliminaire sans toutefois couvrir tous les aspects qu'une conception complète et finale nécessiterait. Nous retrouvons, à l'intérieur de ce mémoire, une section qui définit le problème. Cette section comprend

le contexte général régissant les travaux, la problématique en matière de recherche et développement de missions planétaires, l'élaboration d'un cahier des charges ainsi que les objectifs fondamentaux du projet. Le chapitre 2 contient une revue de littérature, couvrant les principales recherches faites au sujet des robots sauteurs ainsi que sur d'autres mécanismes importants et reliés à la conception de ces derniers. Le mémoire couvre, de façon détaillée, les mécanismes principaux tout en présentant les hypothèses faites pour réaliser la conception de ces derniers ainsi que les résultats qui en découlent. Le chapitre 3 traite notamment des simulations cinématiques alors que les chapitres suivants abordent les mouvements engendrés par les mécanismes. Ils comportent les explications nécessaires à la compréhension des concepts retenus et implantés et font le lien entre chaque sous-système. Enfin, les principaux résultats sont présentés et discutés, de même que les conclusions et recommandations faisant partie de cette recherche. Les recommandations couvrent certaines incertitudes liées au fonctionnement du robot tout en apportant une attention aux endroits jugés comme étant les plus critiques. La conclusion finale présente aussi les zones pour lesquelles, advenant le cas où il y aurait une seconde itération de robot, un approfondissement supplémentaire devrait être envisagé.

CHAPITRE 1

DÉFINITION DU PROBLÈME

1.1 Contexte

L'exploration planétaire a commencé peu de temps après le début de l'ère spatiale. Dès la fin des années 50, les Soviétiques et les Américains se sont intéressés à la Lune, ce satellite naturel de la terre. Plus précisément, c'est en 1959 que la première sonde lunaire russe, LUNIK 1, fut envoyée en direction de la Lune. Ceci marqua le début d'une série d'événements qui porta LUNA 9 à se poser sur la Lune en 1966. Le point culminant de toutes ces missions fut l'arrivée de l'homme sur la Lune en 1969, avec la mission APOLLO 11 (Figure 1).



Figure 1 Neil Armstrong marchant à la surface de la Lune
(National Aeronautics and Space Administration)

Ces missions avaient avant tout un caractère symbolique et politique au moment de la guerre froide. Toutefois, elles furent également l'occasion pour l'homme de réaliser de nombreuses expériences scientifiques, en particulier sur l'environnement lunaire, son champ magnétique, sa structure interne et le vent solaire. Elles permirent aussi la collecte de roches lunaires qui furent ramenées sur Terre aux fins d'analyse. La dernière visite de la Lune date de 1998 avec la mission américaine : LUNAR PROSPECTOR. Cette sonde fut placée en orbite autour de la Lune pendant quelque

18 mois, et ce, dans le but d'étudier la composition de la surface lunaire, de mesurer le champ magnétique et d'analyser les variations du champ gravitationnel de cette dernière. L'un des résultats les plus marquants fut la corroboration de données prélevées quatre ans auparavant à l'aide de la sonde CLEMENTINE (NASA/CNES) sur les fortes concentrations d'hydrogène aux deux pôles, signe de la présence potentielle de quantités significatives de glace dans certains cratères. La mission se termina lorsque la sonde fut forcée, de façon délibérée et calculée, à s'écraser à l'intérieur d'un cratère près du pôle Sud dans l'espoir de provoquer l'apparition de vapeur d'eau à partir de possibles couches de glace.

À la même occasion, les scientifiques et plusieurs agences spatiales se sont intéressés à la planète Mars. Bien que l'exploration de Mars semble avoir commencé au début des années 60 par les Russes et leurs programmes MARSNIK 1 et 2, rien ne fut lancé avec succès avant 1965. MARINER 4, après six (6) tentatives infructueuses, fut la première sonde à survoler la planète rouge. Quelques autres missions suivirent, dont MARINER 6 et 7 qui nous permirent d'entrevoir la surface de la planète sculptée par l'érosion. Après plusieurs missions échouées, MARINER 9 fut placée, avec succès, en orbite autour de Mars, pour prendre des images de cette dernière. En 1976, deux sondes américaines nommées VIKING ont pu étudier la planète Mars pendant plusieurs années. Ces deux missions comprenaient un orbiteur autour de Mars qui prenait des images de la surface et qui en étudiait l'atmosphère. Parallèlement, une autre sonde, munie d'un mini laboratoire biochimique, se posait sur la surface de la planète pour effectuer des mesures météorologiques et sismologiques et pour analyser des échantillons du sol dans le but de détecter des traces de vie présente ou passée. Une longue pause et plusieurs échecs suivirent le succès des missions VIKINGS.

À l'automne 1996, trois sondes furent envoyées ayant comme destination cette même planète Mars. Les deux sondes américaines, GLOBAL SURVEYOR et MARS PATHFINDER arrivèrent à destination au milieu de l'année 1997 alors que la troisième, lancée par les Russes, s'échoua dans l'océan suite à un lancement manqué. PATHFINDER était d'abord et avant tout une mission technologique dont les objectifs scientifiques passaient au second plan. Composé d'une station au sol (l'atterrisseur

baptisé Carl Sagan) et d'un robot mobile (SOJOURNER), PATHFINDER (Figure 2) devait prouver que l'exploration martienne pouvait être effectuée par des sondes plus économiques et faciles d'assemblage tandis que MARS GLOBAL SURVEYOR avait comme mission de remplacer la sonde MARS OBSERVER qui avait échoué en 1993.

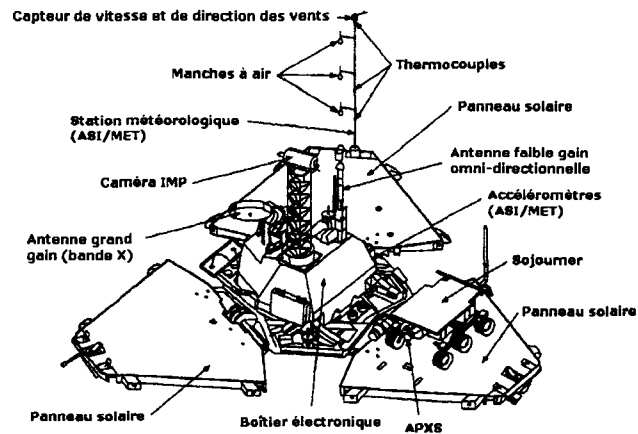


Figure 2 "PATHFINDER" incluant l'atterrisseur "Carl Sagan" et le robot "SOJOURNER"

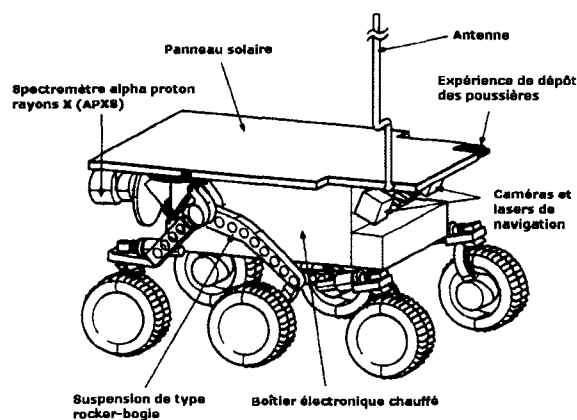


Figure 3 Le robot (rover) américain "SOJOURNER" (adapté de JPL)

Enfin, 2003 fut une année exceptionnelle pour l'exploration martienne. L'Agence spatiale européenne (ESA) lança la sonde-orbiteur MARS EXPRESS avec à son bord, le robot britannique BEAGLE 2. Du côté de la NASA, les robots de sol SPIRIT et OPPORTUNITY (Figure 4) avaient été envoyés en direction de la planète rouge. Les objectifs scientifiques de SPIRIT et OPPORTUNITY étaient l'étude de la géologie des sites d'atterrissage, l'étude de la morphologie de la surface de la planète, dans le but d'y trouver des indicateurs de présence d'eau dans un passé plus ou moins lointain et de calibrer/valider les données obtenues par les orbiteurs MARS GLOBAL SURVEYOR et MARS ODYSSEY.



Figure 4 Le robot américain "OPPORTUNITY" peu après son arrivée sur Mars (Jet Propulsion Laboratory)

Malheureusement, la sonde BEAGLE 2 qui devait se concentrer sur la détection de la vie, fut perdue. Elle fut éjectée avec succès de l'orbiteur MARS EXPRESS mais depuis, aucune communication n'a pu être rétablie.

Plusieurs missions futures en direction de la planète rouge sont déjà prévues dont l'atterrisseur PHOENIX (Figure 5), résultant d'un partenariat entre la NASA et l'Agence spatiale canadienne (ASC). Cette mission aura comme principaux objectifs scientifiques d'étudier l'eau sous toutes ses formes, d'étudier les changements climatiques et d'identifier des environnements qui ont pu être favorables au

développement passé ou présent de formes de vie martiennes. Le lancement de PHŒNIX est prévu pour le mois d'août 2007.



Figure 5 Représentation d'artiste de "Phoenix Lander" à la surface de Mars (JPL)

En général, le taux d'échec des missions martiennes est très élevé : les chiffres démontrent un taux de réussite ne dépassant pas les 34 %. Une stratégie intéressante pour réduire l'impact d'un tel niveau de risque est de réduire radicalement les coûts des missions en se tournant vers des micromissions ou des missions moins complexes. Ces missions miniatures seront très spécialisées et surtout, plus économiques. Une telle réduction a déjà eu lieu dans le domaine des satellites en orbite terrestre où les données historiques tendent à démontrer que le coût typique d'une micromission est de dix à cent fois moins élevé que le coût d'une mission classique. Comme les grandes missions passées, les concepts de micromissions élaborés jusqu'à ce jour comportent des micros et "nanorovers", des atterrisseurs, des orbiteurs et des pénérateurs. Chaque microsonde ou mission simplifiée sera caractérisée par sa spécialisation à un domaine très précis tout en étant de petite taille. Au cours de ces missions, les mêmes domaines scientifiques tels que la géologie, les sciences de l'atmosphère et l'astrophysique, seront traités. La NASA s'approche lentement de cette philosophie avec les missions appelées "SCOUT", des missions qui se verront complémentaires aux missions majeures. La première mission "SCOUT", se voulant à faible coût, se fera en 2007 par le biais du PHŒNIX LANDER.

1.2 Problématique

Le Canada veut, par le biais de l'ASC, participer à l'exploration martienne. En effet, l'Agence spatiale canadienne a maintenant comme priorité de se doter d'un programme actif d'exploration planétaire. Par contre, puisque l'ASC n'a pas les budgets lui permettant de supporter des missions de l'ampleur des grandes missions traditionnelles, les différents groupes de recherches de l'ASC et les scientifiques canadiens tentent de valider différents concepts pour des missions futures à faible coût telles que les micromissions. Ces micromissions sont composées de microrobots et de satellites de faible taille.

Certaines des propriétés de l'environnement martien ont un impact important sur la conception du robot sauteur décrit dans le document. La prochaine section en fait la liste.

Tout d'abord, la planète Mars est une planète tellurique¹, elle est la quatrième planète du système solaire orbitant autour du Soleil. Cette dernière est située juste après la Terre par rapport au Soleil.

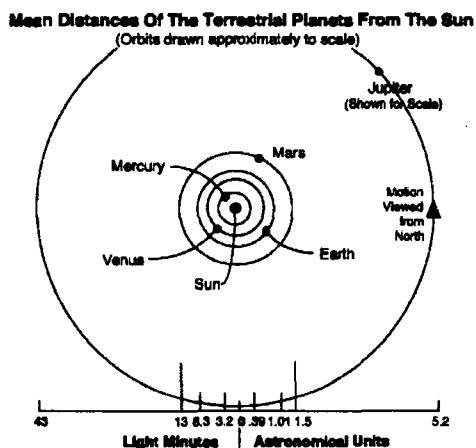


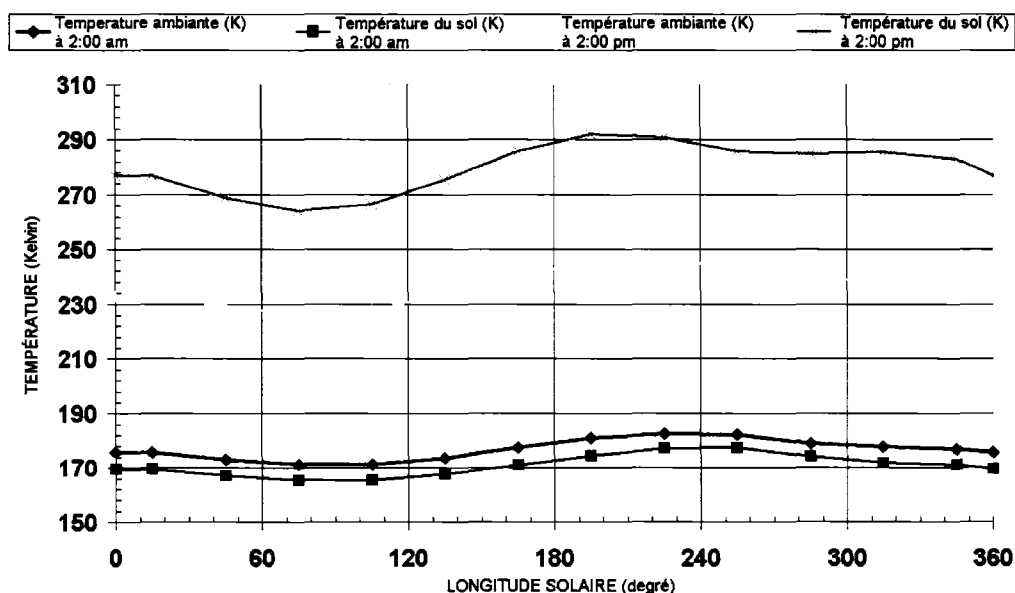
Figure 6 Planètes telluriques à l'intérieur du système solaire (Fundamental astronomy)

¹ Les planètes telluriques sont appelées ainsi car elles ont une surface compacte et rocailleuse comme celle de la Terre.

Elle fait le tour du Soleil en 687 jours et ses journées sont d'une durée de 24 heures 39 minutes et 35 secondes. La distance qui sépare Mars de la Terre varie entre 56 000 000 Km et 400 000 000 Km dépendant de la période.

L'atmosphère de Mars est composée à 95 % de CO_2 , le reste étant essentiellement de l'azote (N_2), de l'argon (Ar), de l'oxygène (O_2) et certains autres gaz rares (He, Ne, etc). Il est à noter que l'atmosphère de Mars contient une bonne quantité de poussière pouvant affecter les systèmes de communications, le fonctionnement des mécanismes et autres sous-systèmes, et ce, surtout en présence de tempêtes de poussière. La surface de Mars est régulièrement balayée par de forts vents pouvant atteindre des vitesses allant jusqu'à 200 km/h.

La température à la surface de Mars fluctue généralement entre $-111\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ selon l'endroit géographique et le moment de la journée. Le Graphique 1 présente les courbes typiques de température ambiante (en Kelvin) à la surface de la planète Mars ainsi que la température du sol, en fonction de la période de la journée et la période de l'année.



Graphique 1 Variation de la température locale à la surface de Mars
(Adapté de Guanghan Wang- ASC)

La pression atmosphérique martienne est très faible. Elle oscille, en moyenne, autour de 7,3 millibars, ce qui correspond à moins de 1 % de celle de la Terre. Par analogie, la pression atmosphérique sur Mars correspond en fait à la pression atmosphérique à 30 km d'altitude sur la Terre.

L'accélération gravitationnelle sur la planète Mars correspond à $3,7 \text{ m/s}^2$, soit environ 38 % de celle de la Terre. Encore là, il s'agit d'un élément important à prendre en considération car, un peu comme pour la Lune, l'attraction vers le sol y est affaiblie par rapport à la Terre.

Le champ magnétique martien observé n'excède pas $1/800^{\text{ème}}$ de la force du champ magnétique terrestre. Ces champs, dits "locaux", se retrouvent à des endroits bien précis de la croûte martienne comparativement au champ magnétique terrestre qui est plutôt "global". Contrairement à la Terre, la planète Mars n'est pas protégée des radiations solaires par une ionosphère ce qui est un facteur important à considérer, surtout dans la sélection des composantes électroniques.

La surface de Mars est composée de sable et de plusieurs roches de dimensions variées atteignant jusqu'à deux (2) mètres de haut, tel que présenté à la (Figure 7). Le sable qui recouvre la planète (oxyde de fer) ressemble, en terme de taille, à celui que l'on retrouve sur la Terre (oxyde de silice). L'épaisseur des couches de sable est de plusieurs centimètres. Il existe sur la planète Mars des régions très cratérisées correspondant à environ 60 % de la surface totale alors que d'autres régions, au contraire, se présentent sous forme de plaines lisses. Cette planète contient plusieurs fractures, vallées, bassins, volcans et canyons.



Figure 7 Image prise par le robot américain "SPIRIT" et montrant le terrain accidenté de Mars (NASA)

1.3 Définition du cahier des charges et des concepts fondamentaux de conception

1.3.1 Général

Cette section définit les spécifications fondamentales du robot, les contraintes imposées au "design" ainsi que celles dérivées en cours de développement. L'objectif principal du projet consiste à concevoir et fabriquer un prototype de robot miniature qui servirait éventuellement à faire des expériences de base (prise d'images du sol, lecture de température et de pression atmosphérique, etc.) sur la planète Mars. Ces travaux de développement serviront, plus particulièrement, à valider la pertinence de ce type de projets en nous situant en ce qui a trait à la faisabilité. Le but fondamental de ce projet de recherche réside dans la démonstration d'un concept qui, éventuellement, pourrait devenir une mission canadienne. Il est à noter que la recherche au niveau des instruments scientifiques à bord du robot (charges utiles) ainsi que des différents concepts d'expériences prévus ne fait pas partie du présent mandat.

1.3.2 Description des prérequis et spécifications imposées

Pour se démarquer des missions martiennes précédentes, il a été décidé de fixer l'enveloppe volumique de départ comme étant un cube ayant des arêtes de 250 mm. Ces dimensions correspondent à une échelle de grandeur "nano", en utilisant, par analogie, la définition des satellites. Il s'agit d'une nette réduction de volume comparativement au plus petit engin robotisé envoyé précédemment sur la surface de Mars. En effet, "SOJOURNER", le plus petit "rover" jamais envoyé sur Mars, mesurait 650 mm par 480 mm par environ 300 mm de haut pour une masse de 10.5 kg. Pour le robot sauteur, la cible visée correspond à un maximum d'environ un (1) kg incluant la charge utile.

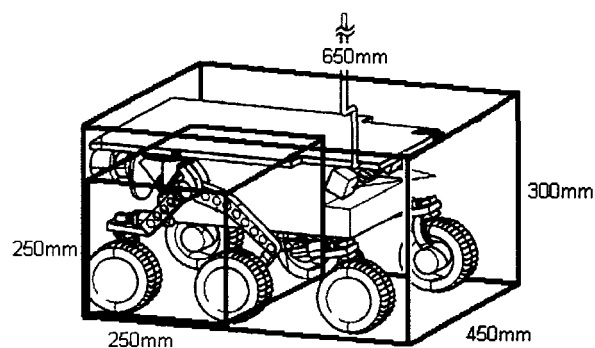


Figure 8 Enveloppe géométrique du robot "SOJOURNER" en bleu comparativement au prérequis de la présente recherche en rouge

Tel que présenté à la section précédente, le sol à la surface de Mars est très rocailleux et sablonneux. À certains moments, cette surface peut ressembler à un désert alors qu'à d'autres moments, elle ressemble à une carrière de roches. Pour cette raison, le "rover" "SOJOURNER", compte tenu de ses roues de faibles tailles, devait contourner les roches recouvrant la surface de Mars. En effet, le robot "SOJOURNER" pouvait franchir, sans avoir à les contourner, des roches atteignant une hauteur maximale égale au diamètre de ses roues, c'est-à-dire, 12 à 15 cm. Plus tard, les robots "SPIRIT" et "OPPORTUNITY", ont pu, grâce à leurs roues de plus grande dimension², parcourir plusieurs kilomètres. Grâce à un système de vision très sophistiqué, ces

² Ces "rovers" ont été conçu avec des roues de 26 centimètres de diamètre

robots peuvent contourner les roches pour continuer leurs parcours. Dans le cas présent, étant donné que l'enveloppe volumique et la masse à respecter sont très restreintes, ainsi que dans un but de simplicité³, il a été décidé de ne pas opter pour ce genre de système de vision. Pour cette raison, et avec le souci de se déplacer dans la plus grande variété de terrains possible, une des solutions envisagées est de faire appel à des moyens de locomotions permettant au robot de passer par-dessus les roches recouvrant la planète Mars. C'est pourquoi beaucoup d'intérêt est porté sur les concepts de robots "sauteurs" et de robots "volants".

En utilisant des données topographiques de Mars, fournies par la NASA, ainsi qu'une évaluation de la grosseur des roches et de leurs dispositions sur la surface martienne, il a été évalué qu'il fallait, afin de maximiser les chances de couvrir une superficie intéressante⁴, être capable de sauter ou voler au-dessus de roches atteignant au moins un (1) mètre de haut. En effet, en permettant au robot de franchir des obstacles de l'ordre d'un (1) mètre de hauteur, les données reçues de la NASA confirment que de façon théorique, il serait possible d'avoir une autonomie de couverture de la planète atteignant au-delà de 95 % de la surface.

Compte tenu de la petite taille du robot et par conséquent des panneaux solaires, il a été décidé de ne pas dépendre de l'électricité comme principale source d'énergie motrice pour les déplacements du robot. Ce qui signifie que nous aurons le loisir d'utiliser l'entière puissance provenant des panneaux solaires pour alimenter les instruments scientifiques faisant partie de la charge utile. Les déplacements du robot, assurés par le système de locomotion, devraient être alimentés par une source de puissance considérée comme étant "durable"⁵.

De plus, toujours dans une même perspective de simplification du robot, il a été décidé de minimiser la quantité d'actionneurs faisant partie de la conception. Les actionneurs sont des composantes qui figurent généralement parmi les éléments les plus sensibles

³ La simplification des systèmes rend les micro-missions moins risquées

⁴ 95 % de la superficie totale de Mars.

⁵ Disponible pour une longue durée ou "renouvelable"

aux défaillances. Pour ce faire, la recherche et le développement ont été entrepris en se limitant à un seul et unique actionneur. Cet unique actionneur devra être utilisé pour réaliser toutes les tâches reliées à la locomotion du robot.

Voici un résumé des principaux prérequis, spécifications et particularités imposées pour la recherche :

Tableau I

Résumé des prérequis de conception

Volume :	Cube de 250 mm x 250 mm x 250 mm
Masse max. incluant la charge utile :	1 kg
Hauteur des obstacles à surmonter :	1 mètre de haut
Type d'atmosphère :	Principalement composé de CO ₂
Vitesse max. des vents à la surface de la planète :	200 Km/h
Température à la surface de la planète :	Varie entre -128 °C et 27 °C
Accélération gravitationnelle :	3.7 m/s ²
Pression atmosphérique :	(7.3 millibars) ou 1/160 ^{ème} de celle de la Terre

Autres prérequis :

- Ne pas utiliser l'électricité comme moyen de propulsion ou pour les actionneurs;
- Un seul actionneur pour générer tous les mouvements du robot.

1.3.3 Stratégie de locomotion

Plusieurs moyens de locomotion peuvent être envisagés pour réaliser une mission à faible coût sur la planète Mars. Pour les raisons énumérées précédemment, il est toutefois judicieux d'exclure les robots roulants ("rovers") et les robots rampants. Ces derniers nécessiteraient des systèmes de contrôle très sophistiqués et compte tenu de

leur faible taille, ils risqueraient de s'embourber ou de se faire ensevelir lors des nombreuses tempêtes de sable à la surface de Mars. Même constat en ce qui concerne les robots volants. Bien que cette technique puisse fonctionner, compte tenu de la faible densité d'atmosphère à la surface de Mars, il serait très difficile de générer une circulation d'air suffisante afin de permettre à un robot-oiseau ou un robot-insecte par exemple, de voler.



Figure 9 Robobug (National Geographic)



Figure 10 Robot rampant "snakerobot" (Carnegie mellon)

Enfin, après plusieurs idées rejetées dès le départ et d'autres étudiées plus en profondeur et discutées, les robots de type "sauteurs" paraissent pratiques et simples pour se déplacer à la surface de Mars tout en tenant compte de l'application précise. En effet, le saut est le moyen de locomotion qui semble le plus avantageux à différents niveaux. Premièrement, comme l'accélération gravitationnelle à la surface de Mars est presque trois fois moindres que celle agissant sur la Terre, un peu comme sur la Lune ou dans l'espace, le robot "sauteur" pourrait, pour une force impulsive similaire, faire

des bonds plus importants que sur la Terre. Il ne suffit qu'à penser aux astronautes qui ont rapidement adopté une technique marche/saut pour se déplacer plus efficacement à la surface de la Lune. De plus, la faible densité de l'atmosphère en présence autour de Mars favorise la distance parcourue lors d'un saut en générant une force de traînée plus faible que sur la Terre. Au lieu de contourner les obstacles en utilisant un système de vision artificiel, un contrôle avancé et plusieurs actionneurs, il est avantageux, avec ce moyen de locomotion, de pouvoir directement franchir, en sautant, les roches qui recouvrent la surface martienne. Ce type de robot devrait être capable de répondre aux prérequis en matière de déplacements, de transport de charges utiles scientifiques, de dimensions et de masse et ce, tout en respectant les contraintes de bases qui résident dans la simplicité et l'innovation.

Avec ce type de robot, il est possible d'innover au niveau de la conception des mécanismes et surtout, d'utiliser un minimum d'énergie électrique pour le déplacement et le positionnement. Comme ce type de robot permet de parcourir une distance considérable à chaque saut, il peut donc devenir possible d'utiliser un système de contrôle simple et basé sur le principe de la "cible". Par exemple, en utilisant le Soleil comme source d'information sur la position, il serait possible de simplement donner la consigne au robot de suivre cette direction ou toute autre direction par rapport à cette dernière et donc, de toujours sauter en s'orientant vers une cible. De cette façon, la distance parcourue à chaque saut serait aléatoire et dépendrait de la force et la direction du vent, ainsi que de l'appui sur le terrain et des obstacles. Ce qui ne constitue pas nécessairement un désavantage. De plus, une fois tous à la surface de Mars, il pourrait être possible, dans une mission composée de plusieurs robots "sauteurs", de permettre à ces derniers de se déplacer de façon complètement aléatoire⁶ et de communiquer entre eux pour ainsi couvrir un très grand rayon d'action.

⁶ Sans aucun contrôle sophistiqué, déplacement totalement aléatoire

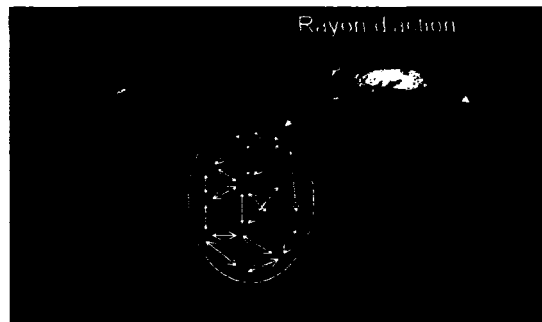


Figure 11 Comparaison du champs d'action de plusieurs "nanorobots" communiquant entre eux versus un seul (ex. OPPORTUNITY)

Il s'agit, encore là, d'un avantage considérable par rapport aux robots de sol de type "rovers" de par l'étendue possible de la zone de couverture (voir la Figure 11).

1.3.4 Description des spécifications dérivées

Voici maintenant quelques spécifications supplémentaires auxquelles le robot sauteur devra être en mesure de répondre en matière de fonctionnalité technique. Ces spécifications "dérivées" agiront tant au niveau du robot lui-même qu'en ce qui concerne la charge utile et ses équipements. Le robot devra être composé d'une plaque d'interface munie de plusieurs points de fixation qui permettront d'y attacher des modules scientifiques agissant à titre de charge utile pour la mission. Cette plaque, sur laquelle seront montés les équipements, devra être protégée de tout contact possible avec des objets à la surface de Mars, tels que des roches. Elle devra également protéger ses équipements de l'excès de poussière pouvant être généré à l'amorce du saut, à l'atterrissage ainsi que lors des tempêtes de sable.

Le robot doit avoir une durée de vie de plus d'un saut. Il devrait avoir la possibilité d'effectuer un ou plusieurs sauts par jour pour parcourir une distance horizontale d'au minimum trois (3) mètres, de façon journalière. Le robot doit, en plus d'avoir la capacité de sauter, être capable de se repositionner entre deux sauts dans le but de se préparer pour le suivant. En effet, une fois prêt pour le saut, le robot sera dans une

position d'attaque optimale tandis que l'orientation⁷, bien qu'elle soit très importante, pourrait être faite de façon aléatoire. De cette façon, lors de la conception, nous aurions la flexibilité de choisir l'angle avec lequel le robot amorce ses trajectoires balistiques sans toutefois avoir de contrôle précis, lors des essais, sur la direction vers laquelle il sautera. Ce qui revient à dire qu'une fois l'angle d'attaque optimal choisi, ce dernier pourra demeurer fixe pendant toute la durée de la mission. Un court chapitre (section 9.2) traite des différentes options d'orientation et de repositionnement possibles en proposant des concepts. Cependant, la première itération de conception du robot sauteur sera basée sur un système aléatoire.

Afin de protéger le robot de tout impact généré par un saut, une contrainte supplémentaire concernant la configuration d'atterrissage est nécessaire. Pour ce faire, les mécanismes externes du robot devraient être le plus regroupés possible lors de l'atterrissage. C'est-à-dire que tous les mécanismes déployables faisant parties de la conception, et non protégés de la poussière et des impacts, devraient avoir la particularité d'être rétractés lors de l'atterrissage.

Le mécanisme permettant le saut (mécanisme sauteur) doit pouvoir fournir l'impulsion de manière appropriée afin d'éviter les pertes d'énergies. Il faut considérer qu'une vitesse de déploiement trop élevée du mécanisme "sauteur", pourrait avoir comme effet de faire sauter le robot prématurément. En présence de ce phénomène, la base du robot (socle) pourrait s'enfoncer dans le sable martien pour ainsi réduire considérablement la portée [7][9].

Tel que mentionné précédemment, l'aspect "innovation" est très important dans le cadre de ce présent travail. C'est pour cette raison qu'un actionneur fait d'alliage à mémoire de forme (AMF) et fonctionnant avec les variations de températures quotidiennes à la surface de Mars sera considéré comme élément de base du projet. Ce type d'actionneur agit comme élément de puissance dit "économique" et durable. L'utilisation d'un ou de plusieurs actionneurs AMF, en plus de ne nécessiter aucun

⁷ Direction suivant laquelle le robot se dirige

apport énergétique provenant de panneaux solaires et de batteries, offre au système une robustesse en absence de sources d'énergie électrique pour des périodes prolongées⁸. Cet actionneur, une fois couplé à un ou des mécanismes, aura la capacité de produire assez de force pour faire fonctionner convenablement le robot sauteur.

Il est toutefois important de prévoir une surface recouverte de cellules photovoltaïques ainsi qu'un espace volumique acceptant des accumulateurs. Ces derniers serviront à faire fonctionner les instruments scientifiques constituant la charge utile du robot.

Un autre point auquel il faut accorder de l'importance concerne la séquence des événements lors du saut. En effet, dans le but de réduire les risques liés à l'utilisation d'actionneurs et de systèmes de contrôles complexes, il a été envisagé d'effectuer les événements (saut, repositionnement, accumulation d'énergie, etc.) de façon séquentielle et ce, en utilisant, un seul et unique actionneur. Voici ces différents événements dans un ordre chronologique d'exécution :

1. Relâchement des mécanismes pour le saut
2. Saut suivant une trajectoire balistique
3. Rétraction des mécanismes pendant la trajectoire
4. Atterrissage du robot au sol
5. Redressement⁹
6. Prises de données scientifiques nécessitant une stabilité du robot¹⁰
7. Recharge des mécanismes en vue du prochain saut
8. Repositionnement

Pour finir, comme la pression atmosphérique de Mars est très faible, un phénomène de dégazage (**outgassing**) des matières peut survenir. C'est-à-dire que la matière subit une "évaporation", voire plutôt une "sublimation" en surface dû à la faible pression d'air

⁸ i.e. la nuit et en période d'éclipse

⁹ Action permettant de remettre le robot sur son socle (ou ses pieds)

¹⁰ Peut se faire pendant la recharge des mécanismes

présente dans l'atmosphère (effet de vide). Cette matière, une fois devenue gazeuse, peut se coller aux lentilles de capteurs et ainsi rendre impossible les lectures de ces derniers ou brouiller les signaux de communication par exemple. Ce phénomène est généralement amplifié à haute température ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) mais il survient quand même à basse température (température moyenne lue sur Mars). Les matières plastiques, les huiles/grasses ainsi que les saletés (impuretés) diverses sont assujetties à ce genre de problème. Ce phénomène devra donc être pris en considération lors du choix des matériaux. Afin de pallier ce problème, la sélection des matériaux sera faite suivant le standard de la NASA: SP-R-0022A "General Specification Vacuum Stability Requirements of Polymeric Material for Spacecraft Application" [37].

1.3.5 Définition de la charge utile (Payload)

Tel que mentionné précédemment, bien que la sélection des instruments scientifiques ne fasse pas entièrement partie du projet de recherche présent, il est tout de même pertinent de se faire une idée des équipements qui pourraient potentiellement faire partie d'une future mission du robot sauteur. Afin de ne pas alourdir inutilement le présent document, le niveau de détail sur les expériences scientifiques présentées plus bas restera limité.

- Station météorologique (SM) :

Ce type d'instrument servirait à prendre des lectures de la température et du flux solaire. L'intérêt pour cette station est principalement basé sur la simplicité, la faible taille, de même que la fiabilité des capteurs en faisant partie. De plus, la combinaison provenant de ces deux lectures pourrait donner de l'information pertinente sur l'inertie thermique du sol de Mars.

- Système d'imagerie microscopique (SIM) et module d'illumination :

Le système d'imagerie microscopique permettrait de prendre des images du sol, situé sous le robot, à une échelle microscopique¹¹. Tandis que le module d'illumination permettrait de générer l'éclairage requis à la prise d'image ainsi que le temps d'exposition de cet éclairage, indépendamment de l'éclairage naturel.

Voici des images typiques prises par ce genre d'instrument monté sur un de nos prototypes de robots statiques¹² (gracieuseté du groupe des Technologies Spatiales de l'ASC):

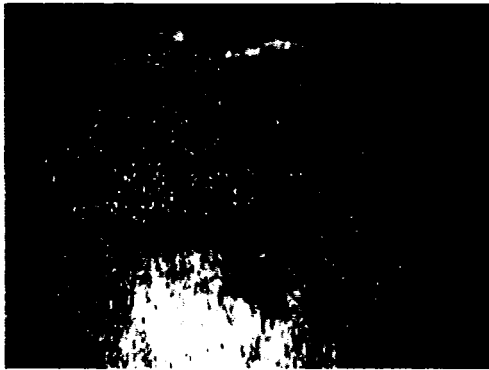


Figure 12 Image du sol prise à la lumière blanche



Figure 13 Même image que celle de gauche prise à l'aide d'un éclairage UV

- Système d'imagerie panoramique (SIP) :

Cet instrument, contrairement au SIM, servirait à prendre des images ayant un format élargi du sol martien. Ces images pourraient être utilisées pour donner de l'information sur l'emplacement du robot et ainsi évaluer la topographie du terrain ainsi que pour plusieurs autres applications scientifiques. Voici une image prise de l'instrument SIM, monté sur un prototype du robot sauteur, et faisant face à un miroir convexe situé au-dessus du robot. Nous apercevons le robot et la surface sur laquelle il repose.

¹¹ Échelle: < 1mm

¹² Qui n'a pas la capacité de se déplacer car dépourvu de tout moyens de locomotions.



Figure 14 Image de synthèse prise par un système SIP
(Agence spatiale canadienne)

- Accéléromètre trois (3) axes :

Un accéléromètre mesurant l'accélération suivant les trois axes du robot sauteur permettrait de déterminer l'orientation du robot par rapport au vecteur gravitationnel. En effet, ce système pourrait fournir de l'information importante en ce qui concerne la détermination de l'attitude du robot qui par le fait même, permettrait aux scientifiques de correctement interpréter les données provenant de la station météorologique (SM). De plus, cet instrument permettrait de situer le robot dans un contexte géologique afin de bien interpréter les deux systèmes d'imageries (SIM et SIP) mentionnés plus haut.

- Magnétomètre trois (3) axes :

L'utilisation de ce type d'instrument permet de déterminer la densité du flux magnétique suivant les trois (3) axes principaux du robot sauteur. La principale utilité scientifique de cet instrument est la possibilité de déterminer le magnétisme résiduel se trouvant dans les roches situées sous le robot ou à proximité de ce dernier.

1.4 Objectifs

Les principaux objectifs de ce projet de recherche sont de concevoir, analyser, simuler et fabriquer plusieurs prototypes de mécanismes imbriqués qui, en utilisant l'énergie thermique à la surface d'une planète (variations quotidiennes de températures jour-nuit) comme source de puissance et couplés à un seul et unique actionneur fait d'alliage à mémoire de forme (AMF), permettront à un robot de se mouvoir. L'ensemble de ces mécanismes devra permettre à un robot dédié à l'exploration interplanétaire de sauter à

la surface de Mars. La conception préliminaire doit permettre au robot de parcourir de bonnes distances en "sautant" et ce, tout en demeurant le plus simple et léger possible et en accommodant une charge utile scientifique.

La conception mécanique préliminaire du robot est faite à l'aide du logiciel de dessin assisté par ordinateur SOLIDEDGE V17 et inclut toutes les pièces nécessaires au fonctionnement du robot. Les pièces disponibles sur le marché sont achetées et les pièces spécifiques, ou "sur mesure", sont modélisées, dessinées et fabriquées. Dans le cas des pièces nécessitant une fabrication à l'aide de machines-outils à contrôle numérique, des programmes de parcours d'outils (G-CODE) sont produits conformément aux dessins techniques. Les analyses et simulations cinématiques des mécanismes nécessaires sont faites avec le logiciel MSC Dynamic Designer Pro alors que les analyses dynamiques, lorsque nécessaires, sont faites à l'aide du logiciel MSC ADAMS. La conception mécanique inclut tous les mécanismes nécessaires au bon fonctionnement du robot mais aussi, un actionneur à alliage à mémoire de forme (AMF). L'actionneur est, comme dans le cas d'un assemblage "sur mesure", conçu, modélisé, fabriqué et testé. L'ensemble du travail de conception est décrit à partir du Chapitre 5.

À la fin du projet, il faudra être en mesure, grâce à la conception d'un prototype, de pouvoir évaluer le potentiel et la faisabilité de ce type de concept. Ce qui signifie qu'en utilisant les résultats obtenus, les gestionnaires de l'Agence spatiale canadienne devraient pouvoir prendre une décision sur la pertinence d'un tel projet et ainsi décider s'il est utile d'investir dans cette voie.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

La portée de la revue de littérature est limitée aux robots "sauteurs", aux concepts mécaniques jugés utiles au projet et aux alliages à mémoire de forme (AMF). La revue des robots "sauteurs" est divisée en trois grandes familles. Premièrement, il y a les véhicules "habités" servant au transport d'humains et contrôlés par ces derniers. Ensuite, il y a les robots "non-habités" de type "sauteur", et les hybrides. Enfin, il y a les recherches faites sur les différents aspects ayant trait à la conception mécanique de robot. Ces articles, plus spécifiques, traitent des mécanismes, des actionneurs et autres particularités intéressantes reliées à la conception mécanique des robots.

2.1 Véhicules habités

Hermann Oberth s'est attardé, vers la fin des années 50, à un concept de véhicule lunaire "sautant" [26]. Ce concept de véhicule lunaire se voulait un moyen de mobilité pour les astronautes à la surface de la Lune. Muni d'un bras télescopique rétractable et amorti, ce véhicule devait être capable de se déplacer sur la surface lunaire en faisant des bonds d'une hauteur de 125 mètres. De plus, un gyroscope, utilisé pour le contrôle et la stabilité du véhicule, servait également d'accumulateur d'énergie et donnait au véhicule une autonomie énergétique lui permettant de faire l'ascension de montagne de plus de 3600 mètres d'altitude.



Figure 15 Réplique d'artiste du "Moon car", tel que pensé par Hermann Oberth en 1959 (Mars institute)

En 1960, H.S. Seifert de l'Université de Stanford et M.H. Kaplan [16][30] donnaient suite aux travaux de Hermann Oberth qui s'étaient arrêtés à des concepts théoriques. Ces recherches ont mené Seifert à la construction d'un prototype de véhicule "sautant" qui servirait de moyen de transport aux astronautes sur la surface lunaire. Il conclut que le véhicule "sautant" est un moyen de mobilité particulièrement efficace dans un environnement à faible gravité.

2.2 Robots non-habités de type "sauteurs"

Le pionnier en matière de robots "sauteurs" est certainement Marc Raibert [29] qui, par le biais du "MIT Leg Lab" [23] a littéralement développé un "zoo" de robots "sauteurs". Les recherches de Raibert ont commencé avec une machine unijambiste ayant la capacité de se mouvoir uniquement dans un plan. Plus tard, il a étudié le contrôle de robots ayant jusqu'à quatre (4) jambes et fonctionnant en trois dimensions.

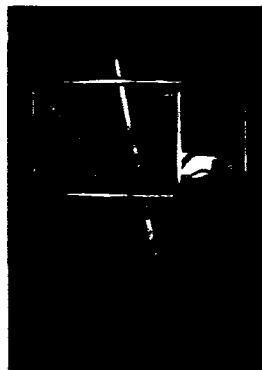


Figure 16 Robot sauteur "unijambiste" 3D développé par Marc Raibert [23]

Au début, ces robots étaient munis d'actionneurs hydrauliques couplés à des ressorts linéaires qui, comme dans le cas des "pogo-sticks", permettaient de produire des sauts verticaux. L'utilisation de l'hydraulique permettait à Raibert de ne pas être limité par la puissance et d'atteindre suffisamment de vitesse pour contrôler le robot. Raibert a, dans un deuxième temps, orienté ses recherches vers des actionneurs électriques dans le but d'éliminer l'ombilical qui reliait inévitablement le robot à la pompe hydraulique [29]. Étant donné que ces actionneurs électriques ne pouvaient plus

fournir la puissance nécessaire, plusieurs nouveaux concepts ont dû être implantés comme par exemple, l'introduction de l'élasticité dans les actionneurs.

Plusieurs autres chercheurs se sont inspirés du travail de M.H. Raibert. Tel est le cas de Rad, Gregorio et Buehler [18][28] ainsi que V. Papantoniou [27] et Lapshin [21]. Ils ont approfondi le travail de Raibert en ce qui concerne le contrôle d'un robot de type "pogo-stick" actionné électriquement et stabilisé sur le plan dynamique.

Depuis le "Ambulatory Robotics Lab" de l'université McGill fondé par M. Buehler, les travaux de Rad et al. fournissent des arguments intéressants afin de remplacer les actionneurs hydrauliques/pneumatiques linéaires généralement utilisés par Raibert, par des moteurs électriques effectuant des mouvements de rotation. D'un point de vue mécanique, il est intéressant de regarder le concept de la jambe robotisée électrique et "dynamiquement stabilisée"¹³, proposé par les auteurs;

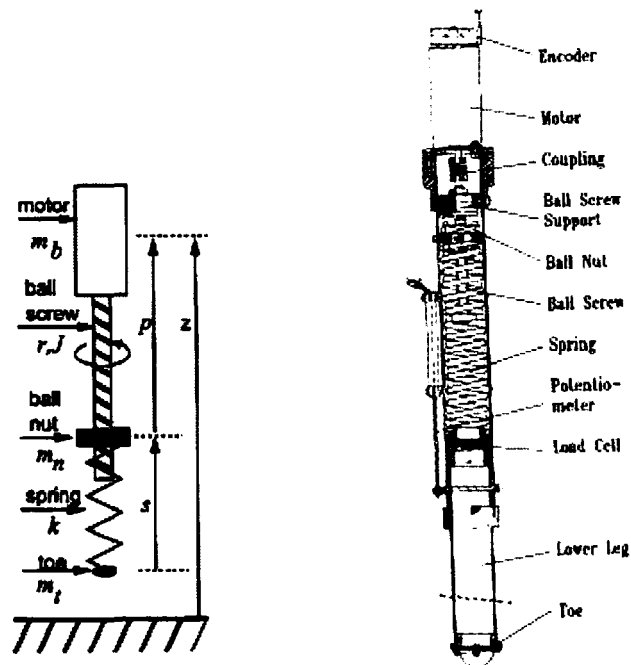


Figure 17 Vues d'assemblage du système étudié par Rad et al.

¹³ Stabilisée grâce à une répétition des sauts comme dans le cas de l'enfant qui saute sur un "pogo-stick"

Simultanément, Papantoniou propose de réduire les uni-jambes robotisées (one-legged robot) de Raibert à l'échelle humaine [27].

V.K. Papantoniou, tout comme Rad et al., stipule que la principale raison pour laquelle Raibert utilise l'hydraulique et la pneumatique dans le choix de ses actionneurs, réside dans le fait que ces derniers ont un très haut ratio puissance/masse. Par contre, l'efficacité de certaines autres composantes indispensables demeure malheureusement très faible (pompe, tuyauterie, servovalves, etc.). "La construction d'un modèle à l'échelle humaine... (donc plus petit que ceux de M.H. Raibert et Buehler) et autosuffisant en énergie, est une tâche très ardue et représente un problème d'ingénierie très sérieux" (adapté de Raibert 1986).

Le modèle proposé devrait opérer avec une puissance moyenne de 48 Watts et sa masse totale ne devrait pas dépasser 7.5 kg. Papantoniou présente une étude approfondie des principes mécaniques et des mécanismes faisant partie de ses recherches.

En partant de l'idée proposée par Raibert, c'est-à-dire une patte télescopique à ressort simple, il existe deux versions différentes;

- Ressort en compression (Raibert) :

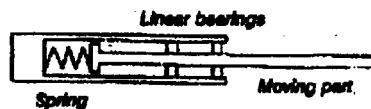


Figure 18 Patte télescopique de Raibert utilisant un ressort de compression (adapté par V.K Papantoniou)

La patte télescopique se bute à un ressort de compression confiné dans un tube. Les principaux points négatifs de cette conception sont l'augmentation de la friction résultant en pertes et l'impact engendré lorsque le ressort se retrouve à son état "complètement comprimé".

- Ressort en tension :

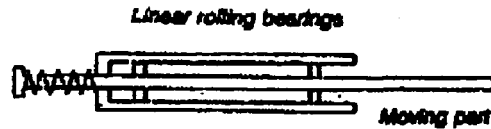


Figure 19 Patte télescopique de Raibert modifiée utilisant un ressort de tension (adapté par V.K Papantoniou)

Le seul avantage de cette conception, par rapport à la première, réside dans la possibilité d'augmenter la distance entre les roulements linéaires ce qui minimise la charge occasionnée par une flexion de la patte sur ces derniers et offre une meilleure stabilité, une fois déployé.

Plusieurs désavantages, selon Papantoniou, en utilisant ces deux (2) conceptions :

1. Les roulements ne sont pas une solution durable car ils résistent difficilement aux impacts. Effectuer une conception en considérant ce phénomène limiterait le pouvoir d'optimisation (patte plus lourde);
2. Remplacer ces roulements par des paliers lisses "bushing" résistants aurait pour effet d'augmenter la friction, et par le fait même augmenter la puissance nécessaire pour la propulsion;
3. Les surfaces en contact avec les roulements doivent avoir une très bonne rugosité de surface (surface lisse et alésée) et un diamètre constant sur toute la longueur du déplacement (de contact). Ce qui peut être très difficile à atteindre en fabrication.

Pour les raisons énumérées ci-haut, l'auteur laisse tomber l'idée de la patte télescopique. Il se tourne plutôt vers une conception de patte à quatre membrures liées (four bars linkage). Après avoir étudié le modèle original du mécanisme de Watt et ses dérivées, selon lui, le plus prometteur correspond à la configuration de Chebychev [5] modifiée en ajoutant un ressort de traction.



Figure 20 Mécanisme à quatre barres rigides (four-bar linkage) de Chebychev avec ressort de traction (Adapté par V.K Papantoniou)

Le mécanisme de traction est le lien entre le mouvement de rotation du moteur et la patte elle-même. La conception proposée doit tenir compte de trois (3) critères majeurs :

1. La transmission doit être pensée de sorte qu'il n'y ait pas de réversibilité possible. Ce qui signifie que le mécanisme doit être "autobloqué" lorsque le moteur est en mode "maintien" (i.e. self-locking @ holding torque);
2. Il doit y avoir une très faible charge appliquée au moteur lors du démarrage car combattre une forte inertie se résume en une augmentation de la puissance nécessaire;
3. Le moment d'inertie de la patte doit être le plus bas possible.

Le mécanisme retenu par Papantoniou est la combinaison d'un réducteur de type "worm gear" et d'un levier qui actionne de façon "directe" un ressort. Ce mécanisme permet de démarrer sans charge. Lorsque la vitesse nominale est atteinte par le moteur, le réducteur (worm gear) sera engagé par le mouvement de traction du ressort de rappel (Voir la Figure 21). En ce qui concerne la réduction du moment d'inertie voulu, puisque les parties les plus lourdes du système sont le moteur, la transmission et les liens, Papantoniou propose de monter ces composantes sur une plate-forme séparée. C'est-à-dire de les découpler de la patte.

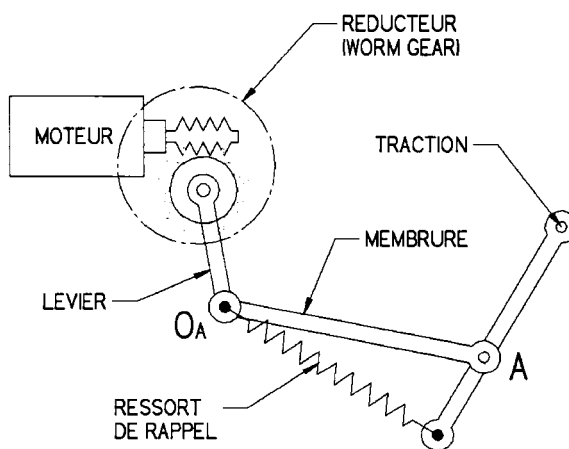


Figure 21 Mécanisme de traction retenu par V.K. Papantoniou (adapté)

Afin de lier le système "moteur-transmission" à la patte articulée, l'auteur propose une version du mécanisme développé par Peaucellier, actionné par un câble, tel que montré à la Figure 22.

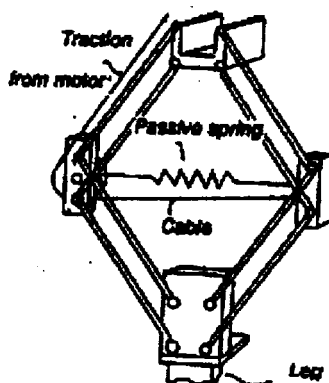


Figure 22 Mécanisme de Peaucellier datant de 1873 (adapté par V.K Papantoniou)

Hayashi et al. proposent des systèmes "sautants" à partir de la dynamique d'une pendule inversée [10]. Ils proposent de simuler et recréer le mouvement du saut produit par l'humain en utilisant la dynamique des bras. Voir la Figure 23 à la page suivante :

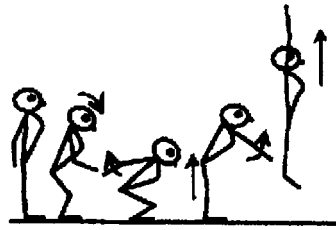


Figure 23 Saut vertical humain et mouvements des bras
(adapté par R. Hayashi et al.)

La structure mécanique consiste en une barre rigide montée sur un joint pivotant permettant une rotation dans le plan horizontal (pour contrôler la direction). Cette barre, munie de deux masses à ses extrémités, est montée sur une autre barre rigide verticale. À la base de cette deuxième barre, on retrouve un autre joint pivotant permettant de créer le mouvement du pendule de haut en bas. Finalement, le tout est monté sur une dernière tige rigide verticale, qui elle-même est montée, de façon rigide, sur quatre pattes-ressorts (springy feet). Voir la Figure 24 qui suit.

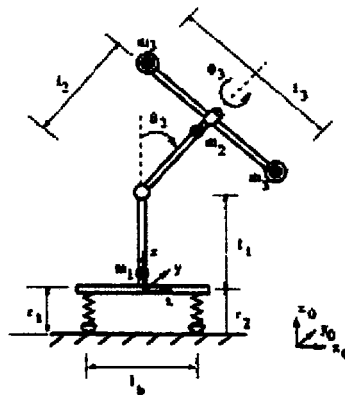


Figure 24 Schéma du robot Stumpy (R. Hayashi et al.)

Brown et Zeglin [4] ont proposé une autre voie d'évolution pour les concepts de Raibert. Il s'agit d'un robot qui "court" en se catapultant suivant le principe d'un arc. Le robot est composé d'une "jambe" élastique de 25 centimètres faite d'une mince lamelle de fibre de verre uni-directionnelle. Avant d'effectuer un saut, un câble tire sur le pied forçant ainsi la jambe à se courber et par le fait même, à emmagasiner de l'énergie

comme un ressort. Lorsque le ressort est relâché, le robot fait un mouvement de rotation autour de l'axe "y".

La masse totale de l'appareil est d'environ quatre (4) kg, répartie comme suit; 0.8 kg en mécanisme, 0.2 kg en batteries et trois (3) kg pour les contre-poids et le "boom". La jambe, flexible, pèse seulement 30 grammes.

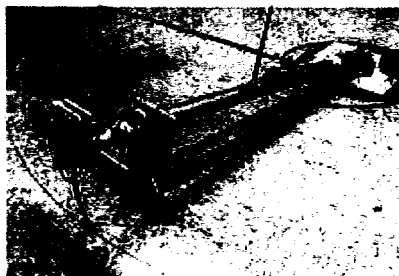


Figure 25 Prototype du robot "BOW LEG" planaire
(Carnegie Mellon University)



Figure 26 Prototype du robot "BOW LEG" opérant en 3 dimensions
(Carnegie Mellon University)

Plus récemment, une équipe menée par Burdick et Fiorini [7][9][24] a proposé un concept de robot sauteur expressément conçu pour l'exploration planétaire. Ces robots sont destinés à opérer à la surface de corps célestes ayant les particularités suivantes : Terrains non structurés et faible attraction gravitationnelle, tel est le cas pour la Lune, les astéroïdes, les comètes ainsi que la planète Mars par exemple. Il s'agit de petits robots (moins de 1.5 kg) qui peuvent sauter suivant une trajectoire parabolique, se

replacer (repositionnement), s'orienter et faire des expériences "de bases". Ces robots ont une durée de vie supérieure à un saut, donc plusieurs cycles et ils sont actionnés par un seul moteur électrique. Tous les robots proposés fonctionnent généralement de façon séquentielle. C'est-à-dire qu'ils exécutent les tâches mentionnées ci-haut les unes à la suite des autres en répétant le cycle au complet pour chaque saut. Ceci les différencie des robots dérivés des travaux de Raibert décrits précédemment qui proposaient plutôt des robots à mouvements continus stabilisés de façon dynamique. La Figure 27 illustre la première génération de robot sauteur proposé par Burdick et al.:

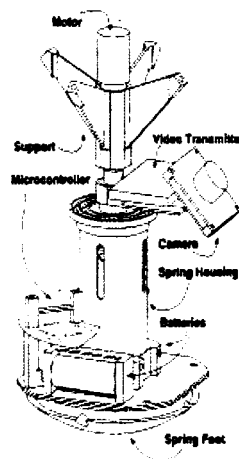


Figure 27 Première génération du robot sauteur (Hopbot) développé par JPL (Jet Propulsion Laboratory)

Le saut vertical est produit par l'action d'un ressort linéaire utilisé pour emmagasiner l'énergie. Ce ressort est comprimé entre chaque saut à l'aide d'un moteur électrique et d'une vis sans fin. L'utilisation d'un système d'embrayage bidirectionnel de type "over-running clutch", montée à la sortie du moteur, permet au robot d'être plus flexible au niveau de l'exécution des tâches. Par exemple, quand le moteur tourne dans une direction, on rétracte le pied du robot alors que lorsqu'il effectue une rotation dans la direction inverse, un déplacement du bras de la caméra se produit.

Passif, le système de redressement¹⁴ est assuré par un centre de masse très bas qui remet le robot sur son socle en forme de section de sphère après le saut (voir la Figure 27).

L'orientation¹⁵ du robot se fait à l'aide du mouvement possible de 360°, d'une caméra autour d'un axe vertical. Le mouvement de la caméra déplace le centre de masse et incline le robot dans la direction du prochain saut.

La forme du robot ressemble à celle d'un œuf (200 mm x 195 mm) dont le centre de masse suivant l'axe vertical se situe à 45mm plus bas que l'axe horizontal (Système de positionnement "passif"). Une cage (membrane rigide) transparente en polycarbonate sert à protéger le robot lors de l'impact sans toutefois nuire à la prise d'image par la caméra.

La masse totale est d'environ 840 grammes et elle est distribuée comme suit : 575 grammes sont situés au niveau du pied (batteries, assemblage du ressort, composantes électroniques, etc.), 200 grammes dans la partie supérieure (cage de protection, moteur, fixtures et roulements) et finalement, 65 grammes faisant partie de la masse qui sert à l'orientation du robot (camera, support, transmetteurs, etc.).

Les meilleurs résultats¹⁶ de sauts effectués par le premier prototype correspondent à environ 80 cm de haut par 30 à 60 centimètres de long.

Les expériences de Burdick et al. ont démontré que leur premier prototype avait une efficacité de 20 %. Donc 80 % de l'énergie emmagasinée par le ressort était dissipée sous forme de friction dans les mécanismes (mécanisme de blocage, de relâchement, de compression du ressort, etc) et surtout dans des mouvements dits "perdus" au niveau du système de propulsion masse-ressort. Par exemple, l'arrêt abrupt de la course du ressort par une butée au décollage. Le fait de "stopper" prématurément et

¹⁴ Le terme "redressement" dans cet ouvrage, signifie "se remettre sur le/les pieds" (tête en haut, pieds en bas)

¹⁵ Le terme "orientation" désigne "se placer dans la ligne de vol" (choisir la direction et l'angle par rapport au sol).

¹⁶ Les résultats proviennent d'essais réalisés sur la terre (gravité, densité d'air, pression, etc.)

de façon instantanée un impact qui devrait être "élastique" a pour effet de faire diminuer de 15 % l'efficacité de leur système. De plus, le système de "repositionnement" passif n'a pas été efficace pour tous les types de sols ou combinaisons de sols. À la suite d'un saut, le robot se retrouvait souvent pris avec la tête en bas et la base (socle) en haut, ce qui rendait le prochain saut impossible. De plus, le sable qui simulait la surface de Mars permettait rarement au robot de se placer dans la bonne direction.

Le deuxième prototype avait pour objectif de régler les trois problèmes majeurs rencontrés avec la première génération. Comme dans le cas du premier prototype, Burdick et al. ont opté pour un mécanisme à ressort afin d'emmagasiner l'énergie nécessaire au saut. La principale raison de leur choix réside dans le fait que les systèmes à ressort sont simples et fiables. Par contre, afin de minimiser les pertes d'énergie et ainsi augmenter l'efficacité, ils ont basé leur conception sur un mécanisme à barres rigides et ressorts combinés. En plus d'augmenter l'efficacité énergétique, ce système réduit considérablement la force nécessaire à la compression et au maintien¹⁷. Ce qui aura pour effet de réduire la taille du moteur ainsi que le système de blocage une fois le mécanisme rechargé.

La Figure 28, présentée à la page suivante, montre les particularités du pied "sauteur" de la deuxième génération. L'idée générale, tout comme dans le cas de V.K Papantoniou [27], est fortement inspirée du mécanisme de Peaucellier [5].

¹⁷ Le terme "Force de maintien" signifie la force nécessaire pour maintenir le ressort en position étirée avant le saut.

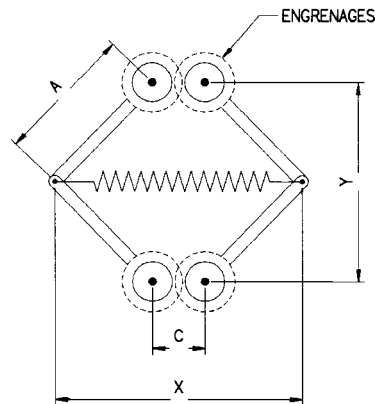


Figure 28 Mécanisme à barres rigides et ressort combinés de la deuxième génération (adapté de JPL)

Le mécanisme à six membrures est composé de ressorts et de barres rigides (voir Figure 28). Ce mécanisme a pour effet de créer un système à ressort non-linéaire (même si les ressorts eux-mêmes sont linéaires). Contrairement au premier prototype, au lieu d'avoir une poussée maximale en fin de course, cette poussée maximale se situe aux deux tiers ($2/3$) de la course, ce qui prévient une perte d'énergie produite par un décollage prématuré¹⁸ du robot.

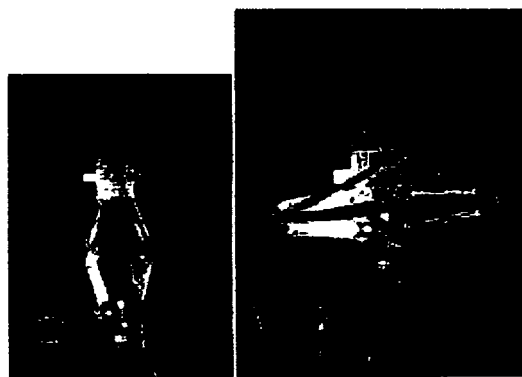
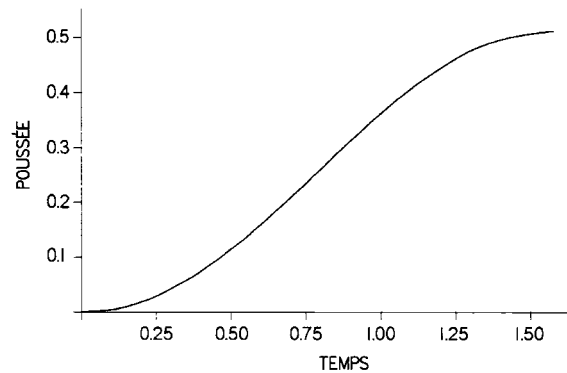


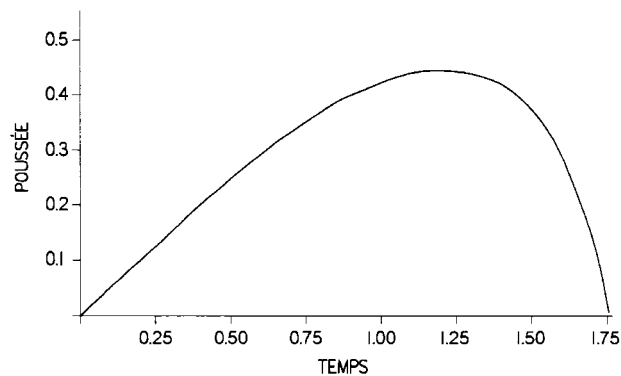
Figure 29 Deuxième génération de robot "sauteur" (Frogbot) du JPL

¹⁸ Décollage du robot avant que le ressort atteigne sa fin de course (perte d'énergie)

Le Graphique 2 et le Graphique 3 comparent les courbes de poussée générées des deux premières itérations de robot "sautteur" proposées par Burdick et al. (adapté de JPL) :



Graphique 2 Courbe de poussée en fonction du temps pour la première génération (Système à ressort linéaire)



Graphique 3 Courbe de poussée en fonction du temps pour la deuxième génération (Système à 4 barres rigides et ressorts de tension)

Le système de positionnement du second prototype est actif. Ce système est composé de trois bras actionnés séquentiellement par le moteur. Ces bras, ou pétales, servent à replacer le robot sur ses pieds, une fois l'atterrissage réussi.

Au lieu d'utiliser un système "masse/bras de levier" comme dans la première itération, Burdick et al. proposent que le pied du robot, monté sur roulement, pivote sur lui-

même. Permettant ainsi au robot de s'orienter sur 360° autour de l'axe vertical. En ce qui concerne l'angle du saut par rapport au sol, un angle fixe de 50° a été calculé comme étant optimal. Le volume total du robot, une fois rétracté, occupe approximativement 15 x 15 x 15 centimètres et la masse totale de l'appareil se situe aux alentours de 1.3 kg.

Le deuxième prototype de robot "sauteur" a réalisé un saut de 0.9 mètre de haut pour parcourir une distance horizontale d'environ 1.8 à deux (2) mètres. Considérant le fait que ces sauts aient été exécutés sur la Terre, on pourrait transposer ces résultats pour l'environnement martien en obtenant un saut balistique atteignant environ trois (3) mètres de haut pour un déplacement horizontal équivalent à environ 6.5 à 8 mètres. Pour un saut sur la planète Mars, Burdick et al. ont fait l'approximation de l'énergie nécessaire à environ 125 Joules.

Voici une comparaison faite entre le "nanorover" proposé par Welch, Wilcox et Nasif [36] et le deuxième prototype de robot "sauteur" de Burdick et al. pour parcourir une distance horizontale de huit (8) mètres sur la surface de Mars.

Tableau II

Étude comparative entre les "nanorovers" et les robots "sauteurs"

	Masse (Kg)	Temps (min)	Énergie (J)	Obstacle (m)
Nanorover	1	4.3	93	0.09
Robot sauteur	1.3	1.5	125	4.5

Les générations suivantes (troisième et quatrième) de robots "sauteurs" proposées consistent en des robots hybrides. Un prototype muni de roues a été fabriqué alors qu'un autre muni de chenillettes a été envisagé. Ces variations sont faites dans le but de permettre au robot d'effectuer de faibles déplacements précis à la suite d'un saut lui conférant ainsi une mobilité complémentaire s'approchant du "rover".

Les chercheurs du centre de robotique et des systèmes intelligents des laboratoires Sandia, sous le financement de la "Defence Advanced Research Projects Agency" (DARPA), ont conçu un robot sauteur fonctionnant sur un principe radicalement différent de tous les autres [8]. Il s'agit d'un microrobot de la taille d'un pamplemousse. Ce robot, muni d'un piston relié à une chambre de combustion, est capable de sauter sur une distance d'un peu moins de deux mètres et d'atteindre jusqu'à un mètre en hauteur. Lorsque l'explosion survient dans la chambre à gaz, le piston se déploie pour ainsi toucher le sol et donner l'impulsion nécessaire au saut.

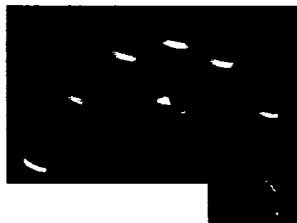


Figure 30 Robot sauteur à gaz développé par les laboratoires Sandia

Le mécanisme à piston ainsi que la chambre de combustion sont tous deux situés à l'intérieur d'une coquille de plastique de forme sphérique. L'extrémité de la coquille permet au robot de se replacer dans la bonne direction après chaque saut (voir la Figure 30). Pour l'instant, ils utilisent un angle d'attaque fixe d'environ 45° , considéré comme étant optimal. Le robot a une masse d'environ 500 grammes et son réservoir de carburant lui offre une autonomie pouvant aller jusqu'à 4000 sauts.

Le but premier dans le développement de ce robot réside dans les applications militaires mais aussi dans l'exploration des planètes. Dans le cas d'exploration à la surface d'autres planètes, les chercheurs et ingénieurs des laboratoires Sandia se fient aux déplacements semi-aléatoires du robot pour parcourir de bonnes distances. Aucun système de contrôle complexe n'est prévu pour permettre de repositionner le robot dans une direction très précise entre deux sauts. L'orientation du robot se fait plutôt en utilisant une masse décentrée et actionnée par un moteur électrique. Cette masse, ayant la particularité de pouvoir tourner depuis un point de pivot situé au centre de la

coquille sphérique, permet au robot de s'orienter suivant une direction définie. La Figure 31 montre le système piston-chambre de combustion se trouvant sous la coquille protectrice en plastique.



Figure 31 Prototype de robot sauteur muni d'un piston et d'une chambre de combustion (Sandia Laboratories)

2.3 Robots hybrides

En plus des robots strictement sauteurs, certains concepts alliant le saut à d'autres modes de locomotion ont été proposés. Le centre de robotique distribuée de L'université du Minnesota, sous le financement de la "National Science Foundation", de l'armée américaine et de la "Defence Advanced Research Projects Agency" (DARPA), propose un petit robot cylindrique capable de rouler et de sauter. Une des applications pour ce robot serait à des fins de sauvetage/prise d'information en milieu hostile. Ce petit robot, connu sous le nom du projet "SCOUT", a la particularité de pouvoir sauter de marche en marche dans un escalier [31][32].

Le robot proposé a une forme cylindrique de 40 mm de diamètre sur 115 mm de long. La masse de ce dernier se situe aux alentours de 200 grammes. Le robot SCOUT se déplace en combinant le saut balistique et le roulement. En effet, les deux roues montées aux extrémités du cylindre formé par son corps lui permettent de rouler, tandis qu'un pied à ressort lui permet d'exécuter un saut d'environ 300 mm (en fonction de la constante de rigidité du ressort choisi). On retrouve deux moteurs indépendants (1 par

roue) permettant au robot de se déplacer et se diriger alors qu'un treuil permet de contrôler l'activation du pied à ressort. Le premier prototype de SCOUT a une autonomie de 100 sauts et de plusieurs heures de déplacement en "roulant".

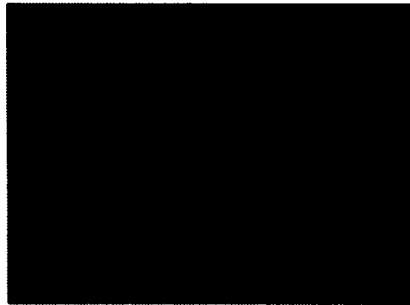


Figure 32 Robot SCOUT développé par DARPA

Une deuxième version du robot SCOUT a été créée afin de permettre au robot de se déplacer plus facilement en roulant sur les terrains avec obstacles. Il s'agit du même corps cylindrique, mais des roues "déployables" ont été ajoutées, ce qui a pour effet d'augmenter la distance minimale entre le corps et le sol pour ainsi être capable de surmonter des obstacles plus hauts.

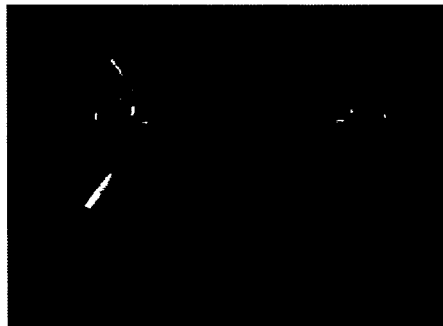


Figure 33 Robot SCOUT : Deuxième génération (DARPA)

D'autres recherches, plus près de l'analogie avec les animaux, sont faites par le groupe de bio-robotique et de biologie de "Case Western Reserve University" (CWRU) en partenariat avec un groupe de biologistes de "Marshall University" [3]. Leurs recherches couvrent le développement d'un microrobot "hybride" et autonome qui se

sert de ses jambes comme moyen de propulsion et d'une paire de roues pour supporter sa partie avant. Les auteurs effectuent des recherches sur ce sujet depuis plus de douze années et ils travaillent sur quatre prototypes différents. Toutes les générations de prototypes utilisent les principes de biologie reliés aux insectes. Comme point de départ, ils ont étudié le saut du "criquet". Pour le moment, ces robots ne font que marcher mais dans un avenir rapproché, les auteurs proposent de les faire sauter.

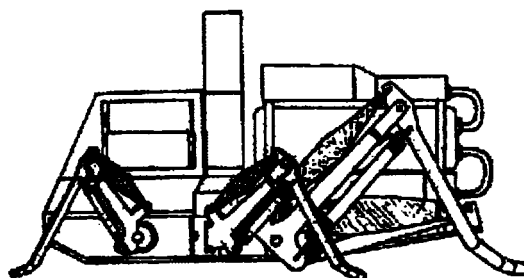


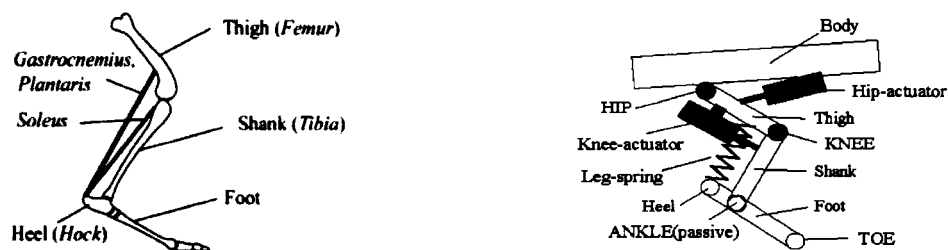
Figure 34 Schéma montrant un concept de microrobot basé sur la biologie des insectes (CWRU)

Le microrobot est principalement composé de muscles artificiels McKibben [6][13] servant à actionner les pattes arrières, d'un micro-compresseur à air servant à acheminer l'air jusqu'à ces muscles, d'un réservoir ainsi que des micro-valves (MEMS). La structure monobloc du microrobot est principalement faite de Delrin® car il s'agit d'un matériau ayant des propriétés structurales convenables, une faible densité et une très bonne usinabilité. La masse totale du microrobot proposé est de 94 grammes incluant les raccords et la tuyauterie (22 gr.), le circuit imprimé et les composantes électriques (30 gr.) ainsi que les deux piles au lithium (2x 14 gr.). Le reste de la masse est réparti dans la structure, les actionneurs, le compresseur et les pattes.

Les animaux, malgré l'influence de la gravité terrestre peuvent développer une force de "propulsion" supérieure à deux fois leur masse. Plusieurs chercheurs en biomécanique se sont aperçus que les tendons jouaient un rôle très important dans la course et le saut de ces animaux. H.C. Bennet-Clark [2] étudie et propose un modèle de transmission de l'énergie pendant le saut de la "sauterelle". Dans cette recherche, l'auteur s'est intéressé sur la façon dont l'énergie est emmagasinée dans la jambe de

l'insecte pour ensuite être utilisée dans le but d'exécuter un saut. Il fait mention que, dans le cas de la plupart des insectes, l'énergie est emmagasinée dans les jambes avant chaque saut. Il en conclut que cette énergie "emmagasinée" constitue la majeure partie de l'énergie nécessaire pour réaliser le saut.

En partant de ce principe, S. Hyon propose une patte articulée [14] composée de trois (3) membrures rigides, deux (2) joints rotatifs "actifs" (Knee & Hip) et un (1) joint rotatif "passif" (Ankle) afin de simuler la patte de l'animal. Les joints "actifs" sont actionnés par des vérins agissant comme des muscles, alors que le joint "passif", libre de toutes rotations par rapport au plancher lors du positionnement "pré-saut" (stance phase), agit comme un point pivot. Les tendons sont remplacés, dans le modèle expérimental, par un ressort linéaire.



a) Représentation de la patte de l'animal

b) Analogie mécanique de la patte

Figure 35 Représentation et analogie mécanique de la patte de S. Hyon

Ces recherches ont donné naissance à un prototype de robot unijambiste nommé KenKen. Ce robot comprend une jambe ayant une masse de 3.6 kg et une longueur variant entre 0.32 mètre et 0.5 mètre. La masse totale du robot est de 13.3 kg. Après plusieurs essais de saut, les chercheurs du Emura Lab se sont rendu compte qu'ils pouvaient permettre à leur mécanisme de courir¹⁹ en ajustant les paramètres de contrôle dynamique.

¹⁹ Saut à haute vitesse

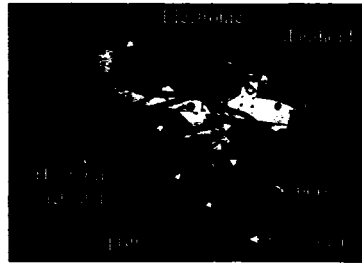


Figure 36 Modèle physique de la patte articulée de S. Hyon (Emura Lab)

2.4 Alliage à mémoire de forme appliqué aux actionneurs

Dès 1975, Wasilewski [35] constate que les propriétés des alliages à mémoire de forme dépendent de l'apparition et de la disparition de la structure martensitique dans la structure de l'alliage. Il y a deux sortes de martensite : la martensite thermique et la martensite provenant des contraintes induites. La martensite dite "thermique" est générée en refroidissant l'AMF sous sa température de transition martensitique tandis que la martensite provenant des contraintes induites, comme son nom l'indique, est générée en appliquant une charge sur l'AMF lorsqu'il est dans sa phase austénitique. Les propriétés d'un AMF sont décrites par la température, l'effet de contraction ainsi que la tension.

Kuribayashi [19], tout comme Hull et al. [12], Khajepour et al. [17] ainsi que Liang et Rogers [22], traite des alliages à mémoires de forme (Shape Memory Alloy ou SMA). Mais il traite surtout de leur utilité et leur application dans la conception d'actionneurs pour les articulations de manipulateurs robotisés dans l'activation de mains de robots ou de bras et de jambe artificiels par exemple.

Les alliages à mémoire de forme (AMF) ont la particularité d'avoir un effet de mémoire de forme (EMF). L'AMF est facilement déformé sous sa température de transition martensitique et lorsqu'il est chauffé au-dessus de sa température de transition austénitique, il retrouve sa forme originale. L'élongation d'un AMF Ni-Ti (Nickel-Titane) varie entre 2 % et 10 % en fonction de la limite en fatigue permise. La Figure 37 montre l'actionneur pour lequel K. Kuribayashi a de l'intérêt :

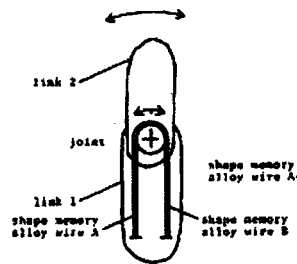


Figure 37 Actionneur à alliage à mémoire de forme (AMF) développé par Kuribayashi

Selon Kuribayashi, les principaux avantages à utiliser un actionneur AMF fait d'un alliage de nickel et titane (Ni-Ti) sont nombreux, en voici la liste :

1. Le recouvrement de la force par unité de masse généré par le fil Ni-Ti au-dessus de sa température de transition austénitique est très élevé par rapport aux autres actionneurs;
2. Compte tenu de la force pouvant être générée, ce type d'actionneur ne nécessite pas d'être combiné à une boîte de réduction de vitesse pour augmenter le couple. Ce qui devient un avantage en terme de simplicité et de masse;
3. Comme la chaleur peut être transmise au Ni-Ti à l'aide d'un simple courant électrique passant à travers le fil, il est donc simple de contrôler la température et ainsi contrôler la déformation de l'AMF donc les mouvements de l'actionneur.

Les Vietnamiens Hiroya Ishii et Ting Kwun-Lon [15] ont, eux aussi, étudié l'utilisation des AMF dans la conception d'actionneur. Comme dans le cas de Kuribayashi, ils proposent un type d'actionneur utilisant un AMF "Ni-Ti" afin de développer le "Travail" mécanique nécessaire. Il existe cependant deux principaux types d'actionneurs AMF linéaires. Le Fil droit (Straight wire) développe une grande force et un faible déplacement. Alors que le fil torsadé (Coil spring) développe une petite force et un grand déplacement.

L'actionneur utilisé dans leur recherche est un AMF de type fil torsadé ou "coil spring".
Ils énumèrent les principaux avantages des actionneurs AMF comme suit :

- Excellent ratio puissance/masse
- Faible masse
- Silencieux
- Résistant à la corrosion
- Bonne conduction électrique et thermique

Le principal désavantage, quant à lui, réside dans une relation non linéaire entre la température et la courbe contrainte/déformation.

CHAPITRE 3

ANALYSES

Ce chapitre fait une récapitulation des principales analyses nécessaires à la réalisation du projet de robot "sauteur". Cette section comprend les calculs ayant trait à la trajectoire balistique souhaitée ainsi que les analyses énergétiques relatives à ce type de propulsion. Les aspects importants de la dynamique et de la cinématique y sont présentés.

3.1 Définition

Tel que mentionné précédemment, une trajectoire balistique devant atteindre une hauteur minimum d'un (1) mètre et une distance horizontale d'au minimum trois (3) mètres est requise. Il est à noter que les calculs ont été effectués en utilisant les paramètres correspondant à la planète Mars. En effet, comme l'accélération gravitationnelle agissant sur la planète Mars est presque trois fois moindre que celle de la Terre, par analogie, le même robot produirait des sauts presque trois fois moins importants, en terme de hauteur, sur la Terre.

3.2 Calcul de la trajectoire balistique et analyse énergétique du système

L'analyse est fondée sur les hypothèses de base suivantes :

- Le robot quittera le sol au moment où la valeur de l'énergie cinétique sera au maximum
- Le saut est effectué à la surface de la planète Mars
- Le saut est effectué à partir du sol et le robot demeure près du sol (Altitude = 0m)
- Le sol est infiniment rigide et ne génère aucun amortissement
- Résistance due à l'air nul (aucun effet de traînée)

Loi de la dynamique :

$$\vec{P} = m \vec{a} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -mg \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = -g \end{cases} \quad (3-1)$$

L'intégration donne;

$$\begin{cases} x = \dot{x}_0 t + x_0 \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 + \dot{y}_0 t + y_0 \end{cases} \quad (3-2)$$

Détermination des coefficients :

$$\vec{v}_{t=0} = \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_0 \cos \theta \\ v_0 \sin \theta \end{pmatrix} \quad x_0 = y_0 = 0 \quad (3-3)$$

Position du robot en fonction du temps :

$$\begin{cases} x = v_0 \cos \theta t \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin \theta t \end{cases} \quad (3-4)$$

En éliminant le temps (t), l'équation suivante est obtenue :

$$y = -\frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \theta} + x \tan \theta \rightarrow \text{Trajectoire parabolique} \quad (3-5)$$

où :

- x = Distance horizontale parcourue en fonction du temps (m)
- y = Distance verticale parcourue en fonction du temps (m)
- x_0 = Distance initiale horizontale (m)
- y_0 = Distance initiale verticale (m)
- v_0 = Vitesse initiale $\left(\frac{m}{s}\right)$
- v_{x0} = Vitesse initiale suivant l'axe horizontal $\left(\frac{m}{s}\right)$
- v_{y0} = Vitesse initiale suivant l'axe vertical $\left(\frac{m}{s}\right)$
- g = Accélération gravitationnelle sur Mars $= 3.7 \frac{m}{s^2}$
- t = Temps (sec)
- θ = Angle d'attaque (départ)

Nous supposons qu'un angle d'attaque à 45° correspond à l'angle permettant de maximiser la portée (distance horizontale parcourue) pour une énergie cinétique donnée.

En fixant la portée à trois (3) mètres ($x=3$) et l'angle d'attaque à 45° ($\theta = 45^\circ = 0.7854$ radian), la hauteur maximale atteinte est calculée comme suit :

$$y_{\text{fin de course}} = 0 = -\frac{\left(3.7 \frac{m}{s^2}\right) \cdot (3m)^2}{2 \cdot v_0^2 \cos^2(45^\circ)} + 3m \cdot \tan(45^\circ) \rightarrow \text{Trajectoire parabolique} \quad (3-6)$$

La vitesse minimum nécessaire au décollage;

$$v_0 = 3.33 \frac{m}{s} \rightarrow \text{Vitesse à laquelle notre robot devra quitter le sol}$$

Le temps nécessaire pour atteindre trois (3) mètres de portée;

$$x_{\text{fin de course}} = 3m = v_0 \cos(\theta) \cdot t \quad (3-7)$$

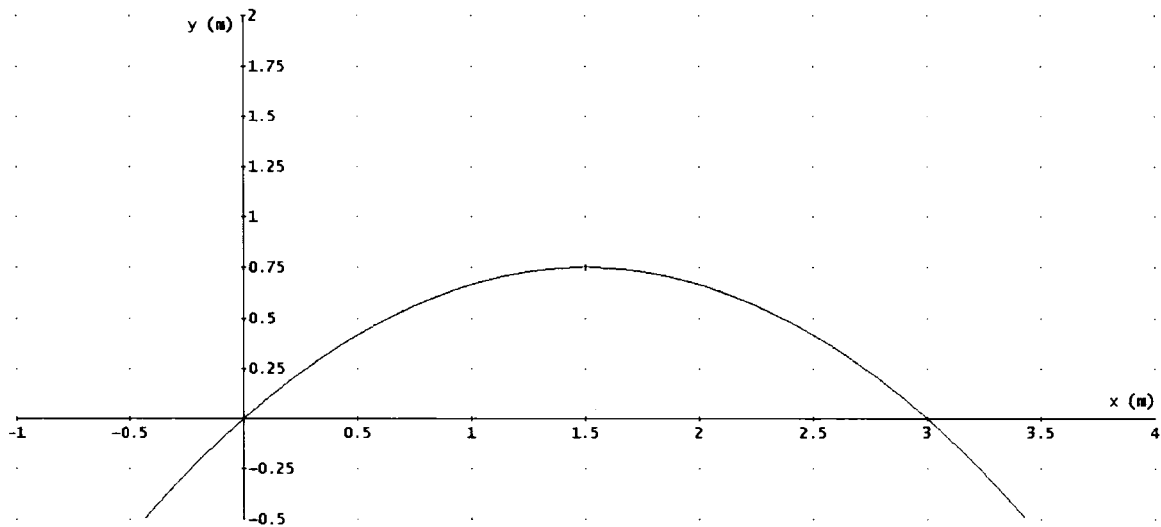
$$t(\text{sec}) = \frac{3m}{3.33 \frac{m}{s} \cdot \cos(45^\circ)} = 1.274 \text{ secondes}$$

En annulant la dérivée de l'équation de la trajectoire (éq. 3-6) présentée plus haut, la nouvelle équation suivante est obtenue;

$$y_{\text{Max}} = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \theta \quad (3-8)$$

Ce qui nous permet de trouver la hauteur maximale atteinte verticalement (suivant l'axe y) :

$$y_{\text{Max}} = \frac{(3.33)^2}{2 \cdot \left(3.7 \frac{m}{s^2}\right)} \sin^2(45^\circ) \approx 0.75 \text{ mètres}$$



Graphique 4 Trajectoire balistique du robot (portée= 3 mètres et $\alpha = 45^\circ$)

Avec un angle fixe de 45° , une distance de trois (3) mètres à parcourir horizontalement et une vitesse fixe de 3.33 m/s^2 , il est donc impossible d'atteindre une hauteur d'un (1) mètre. Ces paramètres ne permettent que d'atteindre une hauteur maximale de 0.75 mètre.

Il est possible d'atteindre une hauteur minimum d'un (1) mètre avec un angle fixe de 45° en augmentant la portée au-delà de trois (3) mètres. La vitesse initiale nécessaire afin d'obtenir une trajectoire atteignant, suivant l'axe vertical, une hauteur maximale d'un (1) mètre pour un angle d'attaque fixe de 45° peut être calculée comme suit :

$$y_{Max} = \frac{v_o^2}{2g} \sin^2(45^\circ) = 1m$$

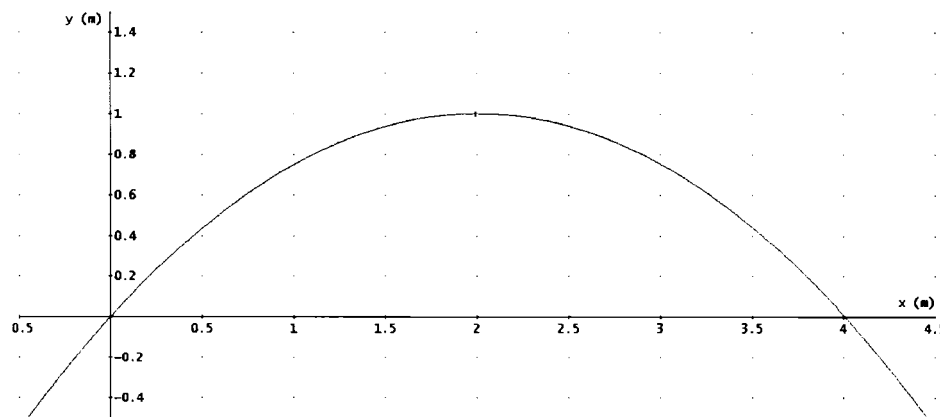
$$v_o = 3.85 \text{ m/s}$$

Regardons maintenant la nouvelle valeur de la portée;

$$y_{\text{fin de course}} = 0\text{m} = -\frac{\left(3.7\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot (x)^2}{2 \cdot \left(3.85\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cos^2(45^\circ)} + x \cdot \tan(45^\circ) \rightarrow \text{Trajectoire parabolique}$$

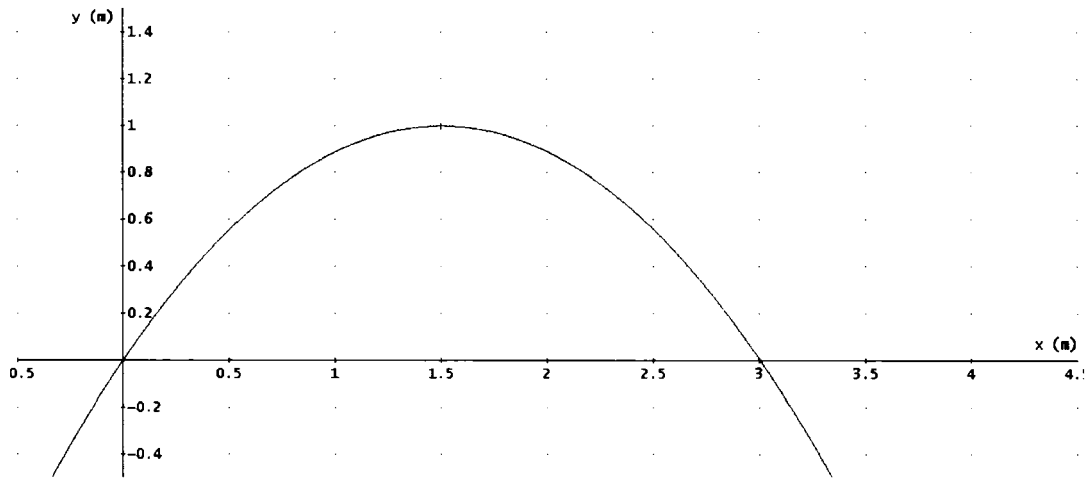
Alors;

$x \approx 4$ mètres \rightarrow Distance horizontale parcourue par le robot



Graphique 5 Trajectoire balistique du robot (Hauteur atteinte= 1 mètre et $\alpha=45^\circ$)

Il est aussi possible de calculer l'angle d'attaque et la vitesse initiale requise pour obtenir une trajectoire d'exactement un (1) mètre de hauteur et trois (3) mètres de longueur. Une analyse effectuée à l'aide du logiciel DERIVE 6, démontre qu'en augmentant l'angle d'attaque à 53° au lieu de 45° , la vitesse minimale permettant de suivre la trajectoire parabolique atteignant un (1) mètre de haut en son maximum pour une portée totale de trois (3) mètres n'est pas tellement affectée. En effet, cette vitesse ne passe que de 3.33m/s à 3.4m/s. Cette solution sera donc retenue.



Graphique 6 Trajectoire balistique du robot
(Hauteur atteinte= 1 mètre, portée= 3 mètres et $\alpha = 53^\circ$)

En résumé, le mécanisme accumulant l'énergie nécessaire au saut devrait permettre au robot d'atteindre une vitesse de décollage d'environ 3.4 m/s. L'angle d'attaque choisi correspond à 53° et sera fixe pour tous les sauts.

La vitesse sera maximale lorsque l'accélération et le déplacement du ressort seront tous les deux nuls.

$$x(t) = 0 = -0.1 \cos(\omega t) \quad (3-9)$$

$$v(t) = 3.4 = 0.1\omega \sin(\omega t) \quad (3-10)$$

$$a(t) = 0 = 0.1\omega^2 \cos(\omega t) \quad (3-11)$$

L'énergie totale réalisée pendant la décompression du ressort, quant à elle, est décrite par l'équation suivante :

$$E(t) = K(t) + U(t) \quad (3-12)$$

où :

$$KE(t) = \frac{1}{2} m \cdot (v(t))^2 \quad (3-13)$$

et

$$UE(t) = \frac{1}{2} k \cdot (x(t))^2 \quad (3-14)$$

Comme la vitesse à atteindre correspond à 3.4m/s, alors :

$$KE = \frac{1}{2} m \cdot (3.4)^2 \rightarrow \text{Énergie cinétique}$$

$$KE = 5.78 \text{ Joules}$$

Alors :

$$E(t) = \frac{1}{2} m (-\omega x_0 \sin(\omega t))^2 + \frac{1}{2} k (x_0 \cos(\omega t))^2 \quad (3-15)$$

Le robot devrait sauter lorsque l'énergie cinétique atteint son maximum :

$$KE = 5.78 \text{ Joules}$$

Donc :

$$5.78 \text{ J} = \frac{1}{2} k \cdot (x(t))^2$$

Alors :

$$5.78 = \frac{1}{2} k (x_0 \cos(\omega t))^2 \quad (3-16)$$

CHAPITRE 4

DISCUSSION SUR LES DIFFÉRENTS CONCEPTS POTENTIELS

4.1 Général

L'étude réalisée à la section précédente (Chapitre 3) permet de déterminer la vitesse devant être atteinte pour faire sauter le robot, ainsi qu'une estimation de la quantité d'énergie à emmagasiner et la force de poussée requise. La section suivante décrit les options de mécanismes qui ont été envisagées pour fournir l'impulsion nécessaire au saut.

Plusieurs idées ont été proposées, voici les plus intéressantes ou pertinentes :

- Ressort linéaire
- Mécanisme à ciseaux rectangulaire
- Propulsion à gaz (utilisation d'un réservoir pressurisé)
- Mécanisme à 4 barres rigides (4-bar linkages)
- Mécanisme à ciseaux cylindrique

4.2 Ressort linéaire

Préalablement étudié par Burdick et Fiorini [9] dans leur première génération de robot sauteur, le système à ressort linéaire est définitivement le plus simple à traiter. Ce type de système propose de monter tous les instruments scientifiques ainsi que la structure du robot sur un ressort linéaire capable de générer assez d'énergie pour permettre à l'assemblage de bondir. Ceci nécessite un ressort ayant une course (amplitude) et une constante de raideur assez grande pour que la vitesse atteinte par le robot soit d'au moins 3.4 m/s lors du décollage.

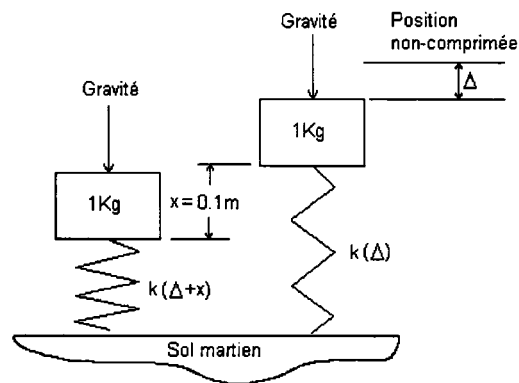
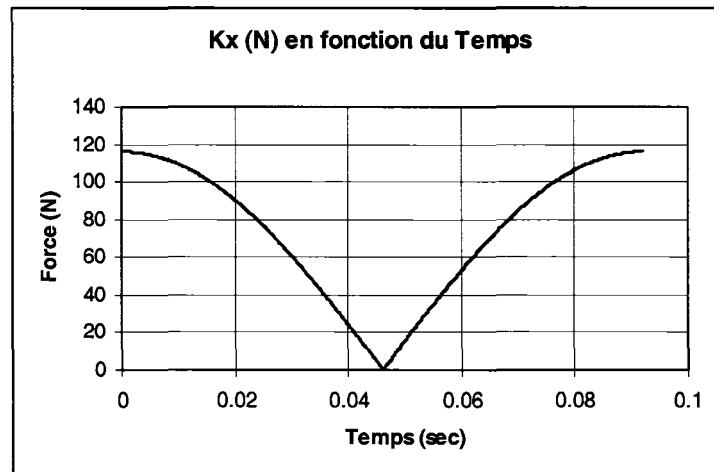


Figure 38 Concept de robot muni d'un ressort linéaire

Cette option n'a pas été retenue à cause du risque d'obtention d'un saut prématuré. En effet, le robot pourrait quitter le sol avant que le ressort linéaire ne soit complètement détendu, ce qui reviendrait à dire qu'une partie de l'énergie emmagasinée par le ressort n'aurait pas été convertie en énergie cinétique. Comme une grande partie du Travail (W) utile s'effectue au dernier moment avant le saut, un saut prématuré affecterait grandement les performances du système pour ainsi réduire la portée du robot. Tel que mentionné par Hale et al. [9], ainsi que dans "*Mechanical Engineering Design*" [33], un phénomène de non-linéarité présent dans les ressorts "linéaires" et appelé "phénomène d'ascension subite" ou "surge phenomena" existe. Des essais effectués sur ce type de ressort ont démontré que dans la plupart des cas, un décollage prématuré est obtenu, limitant ainsi la conversion de l'énergie emmagasinée dans le ressort en énergie utile au saut. De plus, toujours dans l'article de Hale et al., plus la force F_R (force dans le ressort) excède la force " mg " (masse sous l'effet de la gravité) en début de déploiement, plus les chances d'obtenir un décollage prématuré sont grandes. Le Graphique 7 montre l'évolution de la force (Kx) produite par le ressort en fonction du temps, tel que calculé en utilisant les paramètres du robot sauteur.



Graphique 7 Évolution de la force (N) produite par le ressort en fonction du temps (secondes)

La poussée que le ressort procure au robot, lors de l'amorce du déploiement, est largement supérieure à la charge de 3.7 N générée par le poids du robot. Il serait donc très risqué d'utiliser un système à ressort linéaire afin de propulser le robot dans les airs.

4.3 Mécanisme à ciseaux rectangulaires

Le mécanisme à ciseaux rectangulaires s'apparente à l'approche utilisée par Burdick et Fiorini [7][9] pour leur seconde génération de robot sauteur. Ce principe peut comprendre un ou plusieurs ciseaux mécaniques qui, munis de ressorts, permettent d'accumuler suffisamment d'énergie pour que relâchement du mécanisme provoque un saut. Il existe plusieurs façons d'arranger les ressorts et les ciseaux afin de créer un assemblage, qui, situé sous le reste de la structure, serait capable de se déployer pour ainsi créer une force assez grande qui propulserait le robot dans les airs. La Figure 39 illustre, de façon conceptuelle, un mécanisme à ciseaux rectangulaire.

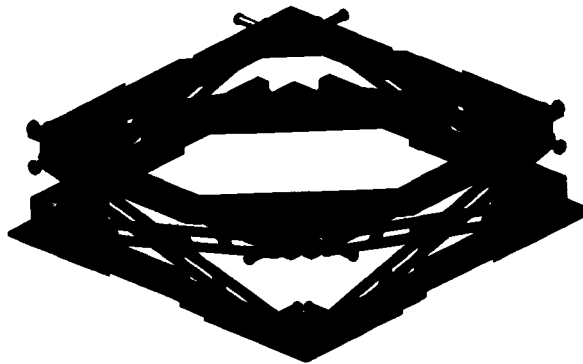


Figure 39 Concept de mécanisme "sauteur" à ciseau rectangulaire (uniquement le mécanisme est montré pour des fins de simplification)

Ce système, tout comme dans le cas d'un système à ressort linéaire, comporte plusieurs problèmes reliés à l'actionneur. En effet, l'utilisation d'un actionneur linéaire devient nécessaire et particulièrement difficile à concevoir. De plus, comme un des pieds du ciseau doit glisser dans une rainure, la friction devient très importante. Comme la force de contraction du ressort risque d'être élevée, il sera nécessaire, pour des raisons dimensionnelles, d'utiliser un assemblage de ciseaux (Figure 39) et ainsi pouvoir répartir cette force à travers plusieurs "petits" ressorts au lieu d'un seul de forte taille. Cependant, en assemblant les ciseaux et en les reliant les uns avec les autres, ce système peut devenir assez complexe à balancer, voire même instable. De plus, basé sur des modélisations préliminaires, ce mécanisme nous paraît difficile à optimiser en terme de volume.

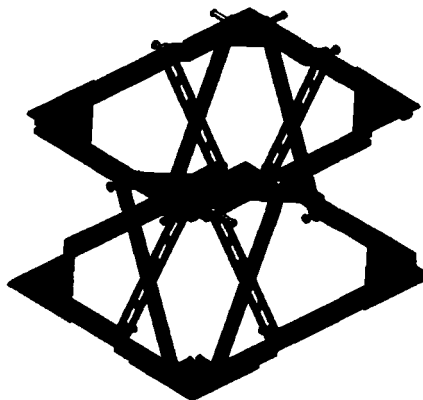


Figure 40 Concept de mécanisme "sauteur" à ciseau rectangulaire déployé

Ce système fut tout de même analysé plus en profondeur que le concept du ressort linéaire. En effet, une conception préliminaire a été faite et plusieurs analyses dynamiques ont été réalisées à l'aide du logiciel MSC Dynamic Designer pro. Il est définitivement plus facile, avec cette configuration, d'assurer et de contrôler l'amorce du saut, que dans le cas d'une configuration à ressort linéaire (section 4.2).

4.4 Propulsion à gaz

Ce type de robot sauteur puiserait la puissance nécessaire depuis un réservoir de carburant pressurisé qui, à l'aide d'une explosion d'un volume de carburant et d'un piston dirigé vers le sol, permettrait au robot de sauter à la surface de Mars. Ce genre de système est, depuis plusieurs années, étudié par les laboratoires Sandia [8]. Bien que la principale raison pour laquelle les chercheurs de Sandia travaillent à la conception de ce genre de robot sauteur soit à des fins militaires, ces mêmes chercheurs évaluent le potentiel intéressant pour de futures missions d'explorations interplanétaires. L'utilisation d'un volume de carburant fixe (énergie non renouvelable) ne satisfait pas les spécifications du système qui consiste à utiliser une énergie durable.

4.5 Mécanisme à quatre (4) barres rigides

Ce système utilise un ressort linéaire afin d'emmagasiner l'énergie nécessaire au saut. Par contre, dans ce cas, le ressort agit en tension plutôt qu'en compression. Le principe ressemble à un mécanisme à ciseau avec la particularité d'avoir quatre membrures au lieu de deux, et deux points de pivots situés aux extrémités inférieures et supérieures des membrures au lieu d'un seul situé au centre comme dans le cas d'un ciseau. La Figure 41 montre ce à quoi pourrait ressembler, schématiquement, ce type de robot :

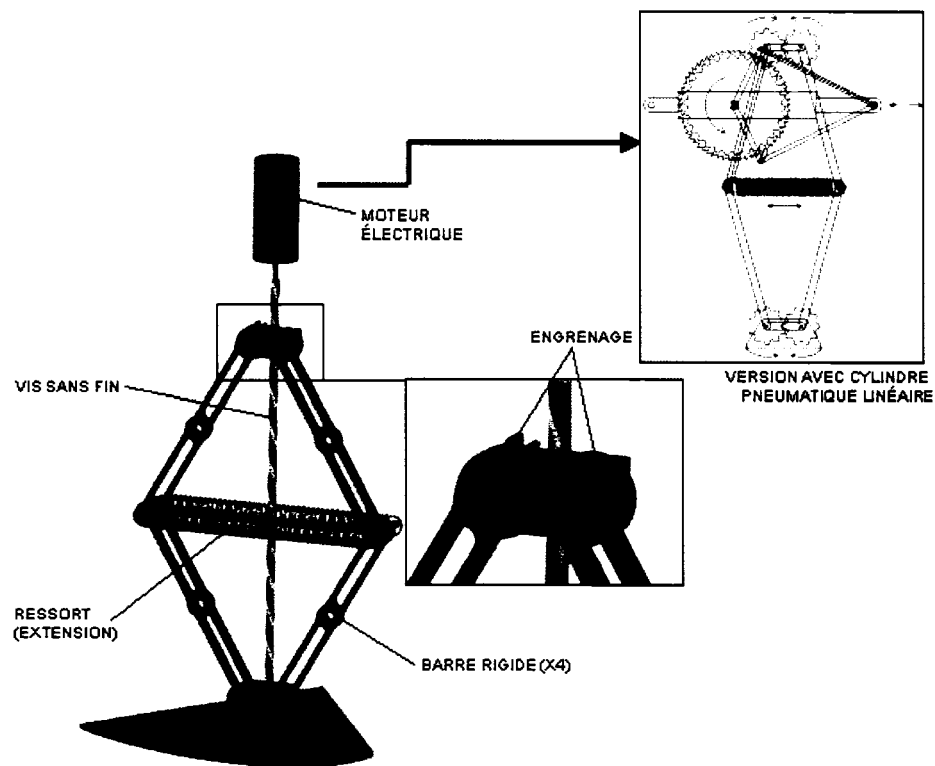


Figure 41 Concept étudié d'un mécanisme "sauteur" à quatre barres rigides et ressorts (basé sur les recherches de JPL)

Ce mécanisme, basé sur le mécanisme de Peaucellier [5], a été à l'étude par Burdick et Fiorini [7] dans leur deuxième itération de robot sauteur dédié à l'exploration planétaire. Comme ce système utilise un ressort afin d'accumuler l'énergie, il demeure simple. Les principaux avantages que procure ce mécanisme par rapport à un simple ressort linéaire, sont en fait, l'augmentation de l'efficacité énergétique et la réduction considérable du risque d'obtenir un saut prématuré (voir Graphique 2 et Graphique 3). Le simple fait d'assembler le ressort et les membrures rigides tel que montré à la Figure 41 permet de réduire, de façon considérable, la force nécessaire à la compression du mécanisme (extension du ressort) tout en réduisant la force de maintien²⁰.

²⁰ Le terme "Force de maintien" signifie la force nécessaire pour maintenir le ressort en position étirée avant le saut

En effet, ce mécanisme à quatre barres rigides et ressorts a pour effet de créer un système à ressort non linéaire (même si le ressort est linéaire). En comparaison au système simple à ressort linéaire présenté à la section 4.2, au lieu d'atteindre une poussée maximale en fin de course, cette poussée maximale se situe au $2/3$ de la course, ce qui prévient, tel que présenté plus haut, une perte d'énergie produite par un décollage prématuré.

Ce mécanisme peut être couplé à un actionneur linéaire ou rotatif. C'est-à-dire qu'il pourrait être choisi d'étirer le ressort longitudinalement à l'aide d'un piston par exemple, ou utiliser un moteur ou un actionneur fait d'alliage à mémoire de forme (AMF) qui, dans un mouvement de rotation, ferait comprimer le mécanisme en entier (voir la Figure 41). Bien que ce mécanisme soit très intéressant et prometteur, il demeure toutefois un sous-système très bien couvert par les recherches de P. Fiorini et al. C'est-à-dire, qu'il est préférable de mettre ce mécanisme de côté pour le présent usage, sans pour autant l'oublier complètement. Nous allons plutôt nous inspirer des recherches de Fiorini et al. sans trop reprendre leurs idées et ce, toujours dans le but d'innover.

4.6 Mécanisme à ciseaux cylindrique

Le principe du mécanisme à ciseaux cylindrique se résume en un mécanisme qui, tout comme dans le cas d'un mécanisme à ciseaux traditionnel, utilise le principe des ciseaux pour guider le déploiement. Cependant, au lieu que le déplacement des parties mobiles du ciseau soit fait de façon linéaire lors du mouvement d'extension et de compression, ces dernières suivent une courbe. Avec ce système, il est possible de positionner une série de ciseaux sur le pourtour d'un cercle qui, en se déployant, feront en sorte que l'assemblage demeure symétrique donc "stable" en position déployée.

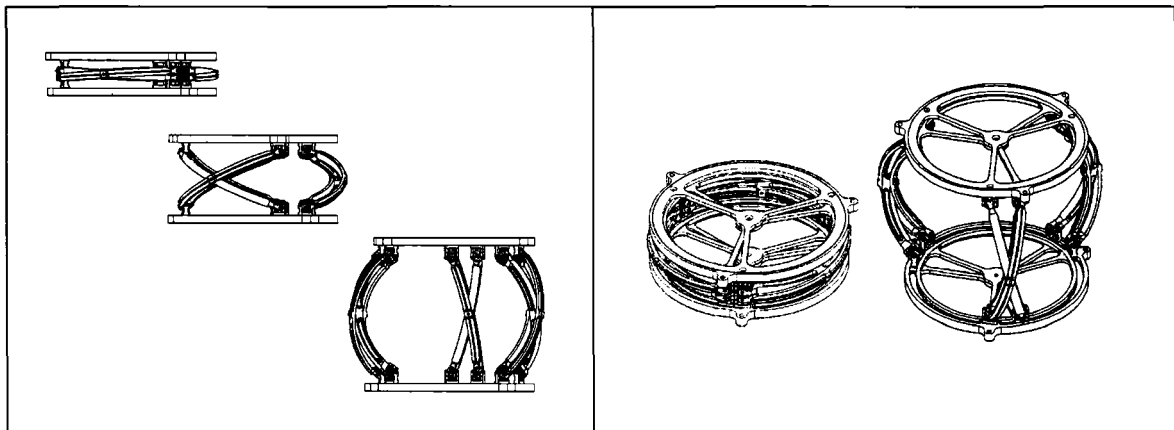


Figure 42 Concept potentiel de mécanisme "sauter" à ciseaux cylindrique

Ce type de mécanisme est, selon nos recherches, une configuration nouvelle. Avec ce mécanisme, les avantages d'un système à ciseaux traditionnel sont obtenus en ce qui concerne le déploiement, alors que les risques d'obtenir un saut prématuré sont considérablement réduits par rapport à un système à ressort de compression linéaire et ce, tout en étant innovateur. Ce mécanisme permet l'utilisation d'un ressort de torsion comme accumulateur d'énergie. L'utilisation de différents types d'actionneurs est possible, allant du moteur électrique jusqu'à l'actionneur fait d'alliage à mémoire de forme. Il devient cependant très difficile d'utiliser un actionneur linéaire afin d'accumuler l'énergie dans le ressort.

Il est certain que la conception, la fabrication et l'assemblage d'un tel mécanisme peuvent s'avérer assez complexes. Cependant, les avantages mentionnés ci-haut, de même que la possibilité de superposer plusieurs de ces assemblages dans le but éventuel d'obtenir une plus grande course, offrent une possibilité supplémentaire. De plus, le fait que le transfert d'un mouvement de rotation, provenant de la base du mécanisme, en un mouvement de translation (produit par l'extension des ciseaux) se fasse directement au niveau du mécanisme, simplifie le reste de la conception. Cet aspect permet de ne pas avoir à tenir compte d'un mécanisme de transmission de mouvement supplémentaire (ex. Pignon-crémaillère).

4.7 Discussion sur les actionneurs

La compression d'un tel ressort devient le défi principal et requiert un actionneur capable de fournir assez de force et de déplacement pour accumuler l'énergie nécessaire. Comme les actionneurs piézo-électriques [25] génèrent des forces assez élevées mais des déplacements de très faibles amplitudes, ils ne peuvent être retenus comme actionneur pour ce type de système. Ce faible déplacement serait très difficile à concilier avec le "design" à ciseaux cylindrique retenu. D'autre part, l'utilisation d'un moteur électrique, accompagné d'un système de transmission, aurait pour effet d'augmenter largement la masse totale du robot sans apporter nécessairement d'avantages. En ce qui concerne l'utilisation d'un actionneur fait d'un matériau à mémoire de forme (AMF), la force à développer n'est pas problème. Cependant, même si ce matériau est considéré comme étant super élastique, il faudra considérer qu'il ne fournit généralement pas d'élongation supérieure à 4 % ou 6 % de sa longueur initiale. Il est toutefois possible d'obtenir d'importants déplacements en utilisant des fils AMF longs. Sur le plan énergétique, l'efficacité relative à la puissance électrique est infinie puisque ce type d'actionneur peut tirer son énergie des variations de température à la surface de la planète Mars, ce qui lui confère un avantage considérable par rapport aux autres.

Pour toutes les raisons énumérées ci-haut, le mécanisme à ciseaux cylindrique a été choisi afin de fournir l'impulsion de décollage nécessaire pour le robot sauteur. Avec ce système, l'utilisation d'un actionneur rotatif fait d'alliage à mémoire de forme (AMF) peut être envisagée. Tel que prévu, cet actionneur servira à appliquer le couple nécessaire sur le ressort principal de torsion servant à emmagasiner l'énergie propre au saut.

CHAPITRE 5

CONCEPTION DU MÉCANISME "SAUTEUR" PRINCIPAL

5.1 Général

Afin de valider le potentiel réel du concept de mécanisme à ciseaux cylindrique, il a été décidé de procéder à une conception préliminaire. Compte tenu que l'enveloppe volumique totale à respecter pour tout le robot correspond à un cube de 250 mm de côté et que le mécanisme d'accumulation d'énergie devrait, éventuellement, pouvoir y être facilement inséré, il a été évalué que le mécanisme, une fois complètement déployé, devrait entrer dans un cylindre ayant une base d'environ 180 mm de diamètre et une hauteur d'environ 200 mm. Puisqu'il est déjà prévu que ce mécanisme prendra un peu d'expansion sur le diamètre en se déployant, en plus d'en prendre longitudinalement pour propulser le robot, cette valeur de 180 mm devra être légèrement réduite et ce, en tenant pour acquis que le modèle géométrique sera construit en position nominale ou "prêt pour le décollage". En plus du volume à respecter, il faudra éventuellement évaluer la course totale pouvant être développée par ce mécanisme.

La conception doit contenir, dans la mesure du possible, des pièces pouvant être fabriquées à l'aide d'une machine à contrôles numériques munie de trois (3) axes de déplacement. Idéalement, le "design" devrait demeurer le plus symétrique possible et la quantité de pièces utilisées, devrait être limitée dans le but de simplifier la fabrication. Ce qui signifie qu'un effort de "standardisation" des pièces doit être réalisé, afin de minimiser le nombre de pièces différentes. Ce qui aura pour effet de simplifier la conception et de réduire les coûts de fabrication.

5.2 Conception et description

Comme point de départ, il a été identifié que des ciseaux devront être fixés sur le pourtour d'un cercle (Figure 42). En fait, il ne suffit qu'à imaginer un système

rectangulaire comme dans le cas des élévateurs à ciseaux "classiques", à l'exception que l'extrémité mobile de la membrure, celle subissant un déplacement longitudinal, devra se déplacer le long d'un cercle au lieu d'une ligne droite comme le montre la Figure 43 :

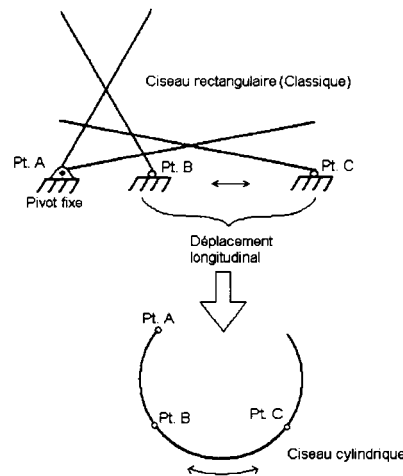


Figure 43 Différenciation du mécanisme à ciseaux rectangulaire classique et le concept cylindrique retenu

Dans le cas d'un ciseau rectangulaire, l'une des branches du ciseau est ancrée au point A. La base de l'autre branche glisse dans une coulisse linéaire du point B au point C. Dans le cas d'un ciseau cylindrique, comme le glissement (déplacement de l'extrémité mobile de la membrure) se fait suivant une courbe, le Pt. A devient une rotule qui agit plutôt comme un joint universel tandis que le Pt. B devenant le Pt. C, après déplacement angulaire suivant cette même courbe, doit lui aussi avoir la fonction de joint universel tout en se déplaçant suivant le rayon prédéfini (Figure 43-partie inférieure).

Dans le cas où le mécanisme serait complètement comprimé et en omettant volontairement la géométrie tridimensionnelle des membrures, articulations, etc., tout en regardant le mécanisme de dessus, nous verrions un cercle avec des membrures situées tout autour. Par contre, lors du déploiement, il est important de constater que les membrures, formant les ciseaux, s'éloigneront de ce cercle tel que présenté à la Figure 44.

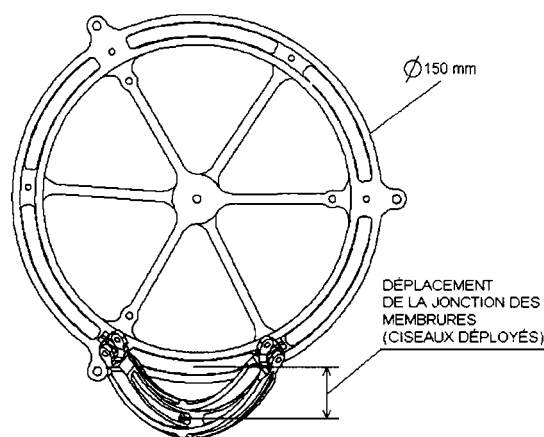


Figure 44 Vue de dessus du mécanisme muni d'un seul ciseau déployé

Afin de procéder à la modélisation de ce mécanisme, il a été décidé de partir d'un disque de 150 mm de diamètre (Figure 45). Il s'agit en fait d'un premier cercle fixe sur lequel les rotules (joints universels) seront montées. Ces joints universels, ayant la faculté de pivoter sur eux-mêmes, permettront d'y installer des membrures qui deviendront plus tard, des ciseaux. Afin de répondre au prérequis concernant la course minimale à respecter lors du déploiement, le nombre maximal de ciseaux pouvant être inclus a été évalué. En principe, plus le nombre de ciseaux insérés sur le pourtour du cercle de 150 mm est élevé, plus le mécanisme sera rigide et stable en position déployée. Cependant, plus il y a de ciseaux, plus ces derniers devront être composés de membrures courtes, ce qui réduit la course²¹ totale "linéaire" développée par le mécanisme.

Le nombre de ciseaux a donc été fixé à trois (3). En effet, trois (3) ciseaux répartis de façon équidistante sur le pourtour d'un cercle offriront une stabilité suivant tous les axes. Dans ce cas, la longueur des membrures peut être estimée en supposant qu'elles occuperont environ un tiers du périmètre du mécanisme en position fermée.

²¹ Déplacement, produit par le déploiement des ciseaux, de la partie supérieure du mécanisme par rapport à sa position initiale

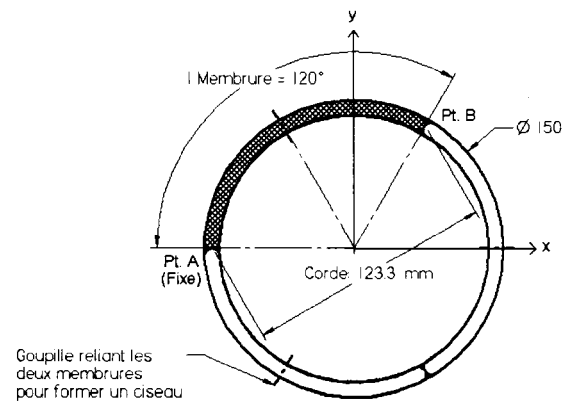


Figure 45 Définition géométrique des membrures de ciseaux

$$\text{Longueur totale de la membrure} = \frac{2\pi r}{3} = \frac{2\pi(75\text{mm})}{3} \approx 157\text{ mm}$$

Voici une image montrant le premier cercle (plateau) et trois (3) membrures disposées de façon équidistante autour du cercle (plateau) et attachées à ce dernier à l'aide de joints universels :

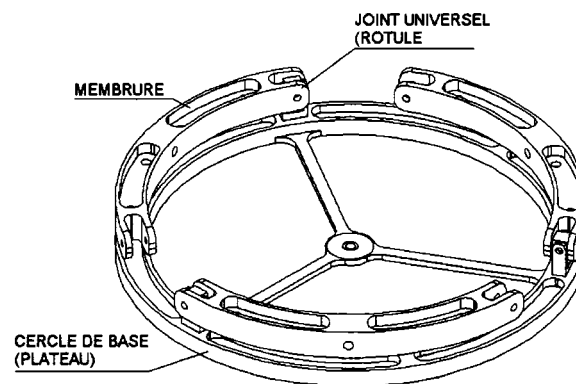


Figure 46 Trois membrures (cylindriques) assemblées sur la base du mécanisme à ciseaux

Lorsque les parties libres des membrures se retrouvent attachées à un autre plateau situé au-dessus de cet assemblage, le mécanisme prend la forme présentée à la Figure 47 :

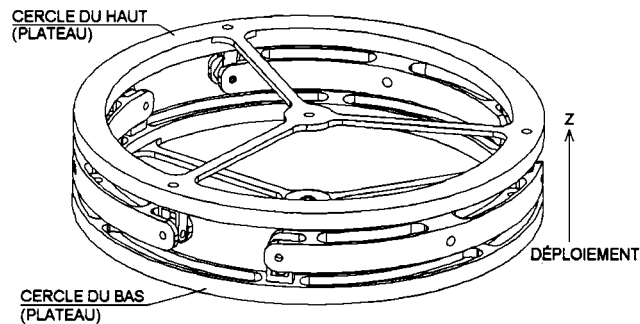


Figure 47 Membrures attachées aux deux extrémités (plateaux) du mécanisme

Le fait d'insérer trois (3) assemblages de ciseaux sur le pourtour du cercle de 150 mm de diamètre permet d'utiliser un arc, décrit par ces derniers, d'au plus 120° (Figure 45) par ciseau (en position rétractée). La longueur de la corde associée à cet arc est d'environ 123 mm. Comme cette corde régit, de façon directe, l'espacement en "z" du cercle du haut par rapport à celui du bas (base du mécanisme) lors du déploiement, nous connaissons donc l'extension totale possible. En utilisant ces paramètres (dimensions), le déploiement maximal de tout le mécanisme ne pourra donc pas dépasser 123 mm. Cette valeur, bien qu'elle soit légèrement au-dessus du requis de 100 mm, préalablement établis, sera sûrement réduite lorsque la conception sera traitée plus en détail. En effet, les conditions pour que l'on puisse utiliser un arc de 120° pour chaque ciseau sont, elles aussi, quelque peu idéales et ne tiennent pas compte de l'espace nécessaire pour les attaches et autres jeux nécessaires au fonctionnement du mécanisme. De plus, il sera impossible pour des raisons géométriques et pour prévenir la singularité, de déployer les ciseaux de façon à ce que les membrures se retrouvent complètement à la verticale.

Regardons maintenant la façon d'arranger les ciseaux afin que le mécanisme fonctionne convenablement. Premièrement, il est important que chacune des

membrures formant les ciseaux ait exactement la même corde. Ce qui veut dire que la distance qui sépare les deux joints universels situés aux deux extrémités des membrures formant les ciseaux doit être identique. Ceci est requis, non seulement pour les membrures formant un même ciseau mais aussi pour chaque membrure formant l'ensemble des ciseaux.

Par ailleurs, comme les extrémités des membrures sont montées sur des rotules, qui elles-mêmes sont montées sur un cercle (plateau), chaque rotule, qu'elle soit fixe ou qu'elle se déplace sur un arc, devrait être installée sur un cercle de rayon identique aux autres. La solution la plus simple est d'imbriquer les membrures d'un même ciseau l'une dans l'autre. La Figure 48, présentée plus bas, montre ces aspects importants devant être pris en considération.

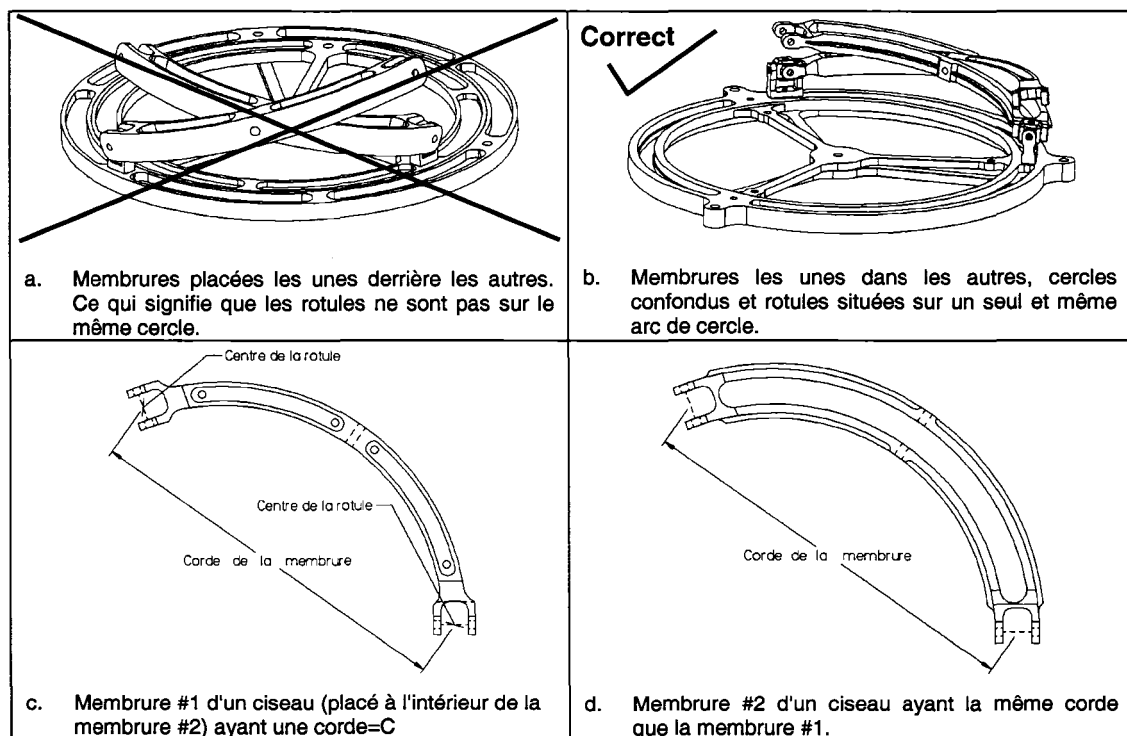


Figure 48 Différents aspects importants à considérer dans la conception des membrures de ciseaux

La Figure 49, présenté à la page suivante, montre un assemblage de membrures formant un ciseau typique. Le terme "typique" signifie que chacun des trois (3) ciseaux peuplant le mécanisme aura exactement les mêmes dimensions. Nous remarquons, sur la vue du dessus, que la jonction²² du ciseau tend à s'éloigner du centre. Ceci illustre clairement l'utilité des joints universels (rotules) positionnés aux extrémités des ciseaux.

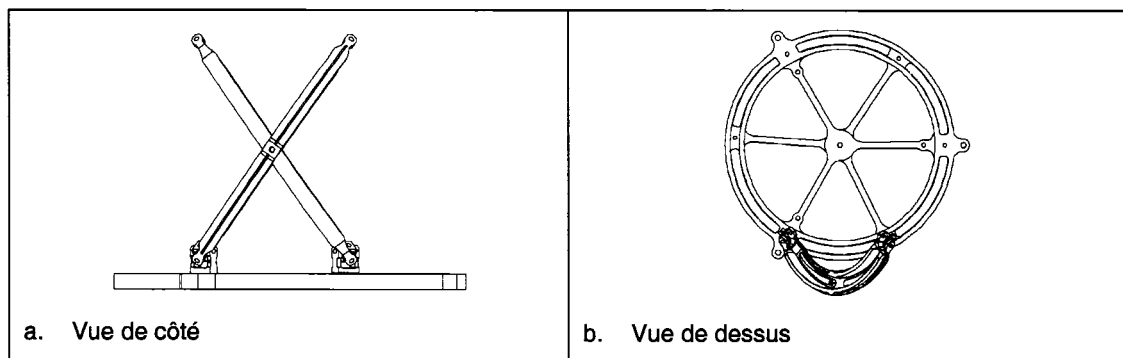


Figure 49 Assemblage de membrures formant un ciseau

En tenant compte de tous les prérequis fixés a priori ainsi que tous ceux qui ont été découverts en cours de développement, une conception fonctionnelle du mécanisme à ciseaux cylindrique a été complétée. Une première maquette d'une échelle de "un pour un" (1:1) a été conçue et fabriquée en aluminium. Cette maquette incomplète a démontré que le concept fonctionnait comme il était prévu. Après quoi, un premier prototype plus détaillé a été fabriqué en aluminium. Ce premier prototype a été conçu, fabriqué et mis à l'essai. Après correction de quelques erreurs provenant du concept préliminaire, un deuxième prototype a été conçu, basé sur le premier et fabriqué en deux (2) exemplaires. Le premier prototype a servi de démonstrateur et a été présenté pour une analyse de brevetabilité alors que le deuxième fera partie de l'assemblage final du robot.

²² Endroit où les membrures se croisent et sont attachées par une goupille pour former un ciseau.

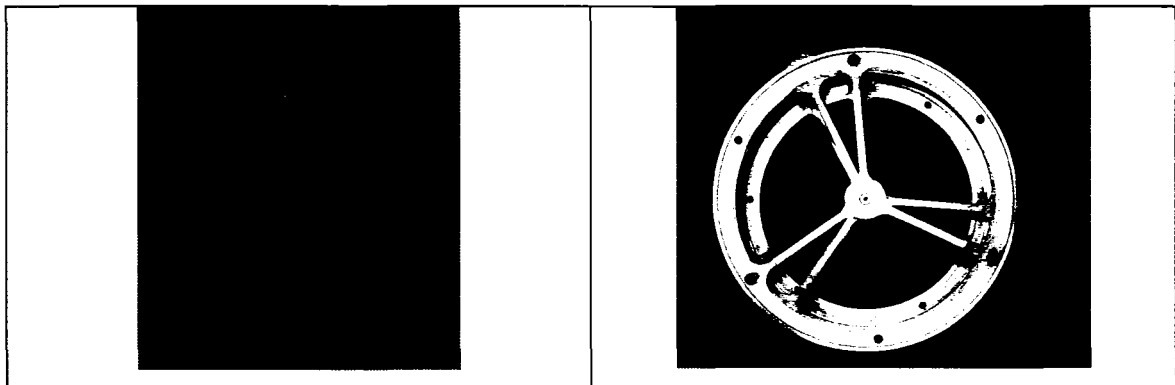


Figure 50 Photographies du prototype final de mécanisme à ciseaux cylindrique

Les principales composantes et sous-systèmes faisant partie du mécanisme à ciseaux cylindriques sont les suivants :

- Plateau circulaire extérieur (x2)
- Plateau circulaire intérieur (x2)
- Assemblage de joints universels (x12)
- Assemblage de ciseaux (x3)
- Ressorts

La Figure 51 qui suit montre, à demi déployé, la conception du mécanisme à ciseaux cylindrique. Les différentes composantes et sous-systèmes y sont présentés.

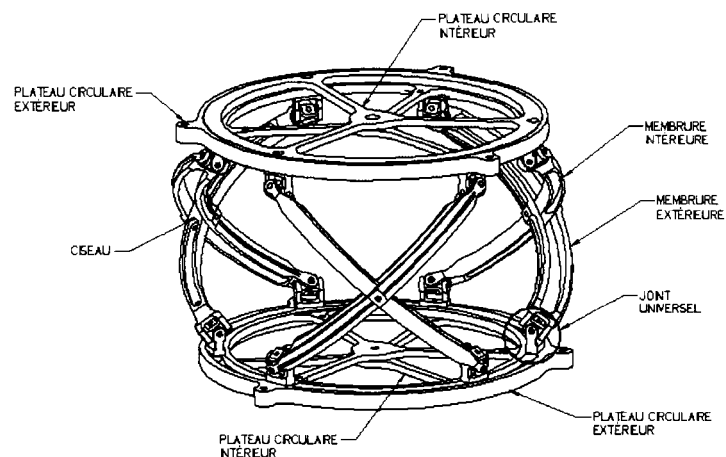


Figure 51 Mécanisme à ciseaux cylindrique assemblé

Il y a deux (2) plateaux situés à l'extrémité inférieure du mécanisme et deux (2) autres situés à l'extrémité supérieure du mécanisme. Ceci facilite la conception du système d'accumulation d'énergie (ressorts). L'utilisation de deux (2) plateaux ayant la faculté de tourner l'un par rapport à l'autre permet d'ajouter des ressorts de torsion. En attachant les extrémités de ces ressorts à chacun des deux (2) plateaux, il est possible d'accumuler l'énergie nécessaire au saut. Il est à noter que dans le cas où la décision aurait été de n'utiliser que deux (2) plateaux (un dans le haut et un dans le bas de l'assemblage du mécanisme), il aurait été nécessaire d'insérer les extrémités mobiles des ciseaux dans des coulisses afin de permettre un déplacement angulaire de ces dernières, ce qui aurait engendré un problème de frottement supplémentaire. De plus, une accumulation néfaste de sable dans ces coulisses aurait été plus difficile à enrayer. Maintenant que le mécanisme est muni de quatre (4) plateaux, l'action de monter-descendre du mécanisme peut se faire simplement en faisant pivoter un plateau par rapport à un autre (ex. tourner le plateau inférieur-extérieur par rapport au plateau inférieur-intérieur).

La Figure 52 montre le mouvement discuté plus haut :

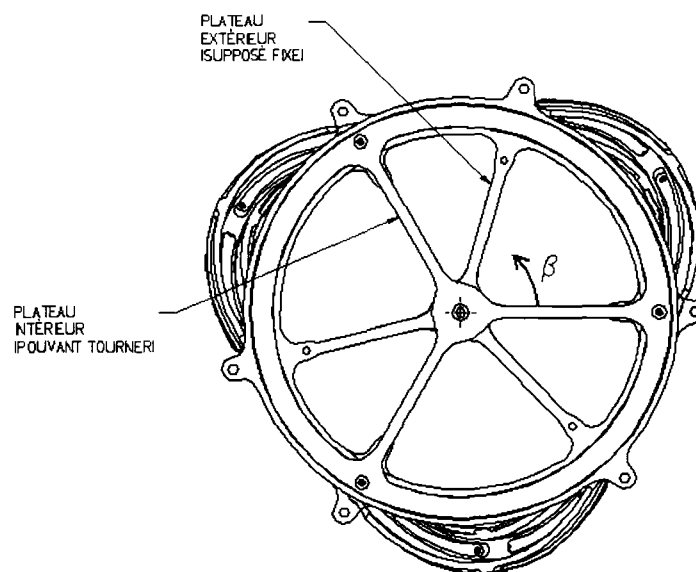


Figure 52 Vue de dessus du mécanisme à ciseaux cylindrique

En supposant que le plateau extérieur correspond au pied (socle) du robot touchant le sol et que sa position demeure fixe par rapport à ce dernier, le simple fait de tourner le plateau intérieur d'un angle β par rapport au plateau extérieur, déploie le mécanisme (voir la Figure 52). Ce principe est d'autant plus intéressant pour le futur actionneur qui devra être intégré dans l'assemblage. En effet, un déplacement de moins de 120° , facilement atteignable à l'aide d'un actionneur à AMF, pourra complètement rétracter (comprimer) le mécanisme depuis sa position déployée.

En ce qui concerne les joints universels, ils servent, tel que mentionnés plus haut, à retenir les membrures formant les ciseaux sur leurs plateaux circulaires respectifs. Ils permettent aux extrémités des membrures de pivoter autour d'un point et ainsi donner la liberté nécessaire aux ciseaux de se déployer.

La Figure 53 montre un joint universel typique, les flèches vertes montrant toutes les rotations possibles (DDL):

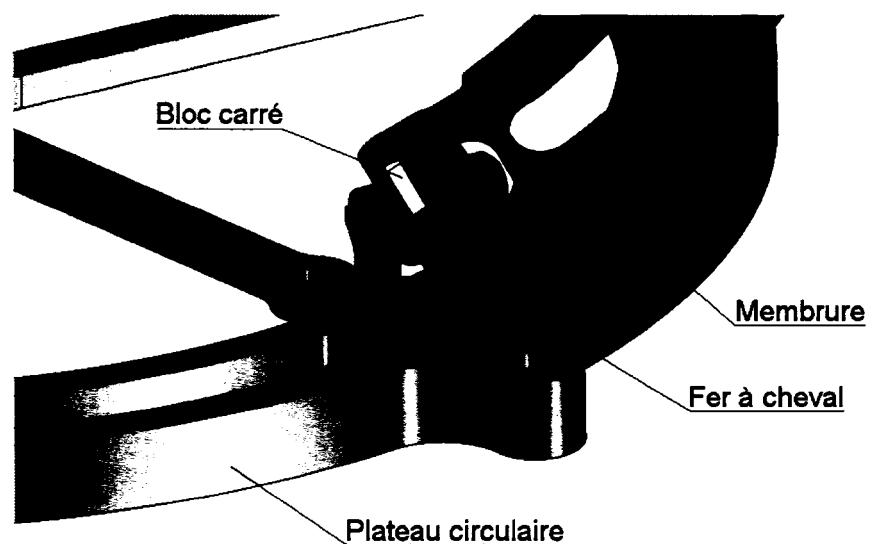


Figure 53 Joint universel (rotule) reliant les membrures aux plateaux (inférieurs et supérieurs)

La prochaine étape de conception consiste à ajouter les ressorts de torsion servant à accumuler l'énergie nécessaire au saut. Ces ressorts devront être assez puissants pour déployer le mécanisme et ainsi permettre au centre de gravité du robot d'atteindre une vitesse en fin de course de 3.4 m/s. Cette vitesse de décollage permettra au robot de bondir à la surface de Mars suivant la trajectoire balistique déterminée plus tôt.

Bien que le mécanisme fonctionne convenablement, qu'il n'y ait pas d'interférences mécaniques et qu'il réponde aux besoins préalablement fixés, il toutefois judicieux de procéder à une analyse cinématique et dynamique du déploiement de ce dernier. Cette analyse permettra de quantifier la raideur nécessaire des ressorts qui servent à réaliser le saut. De plus, il sera possible d'obtenir, de façon assez juste, la vitesse de déploiement du mécanisme et l'énergie développée en fonction du temps ce, pour les ressorts choisis.

5.3 Analyse dynamique du mécanisme

Paramètres utilisés;

- Masse du robot : un (1) kg (incluant le mécanisme, les ressorts, les instruments scientifiques et le reste du robot)
- Accélération gravitationnelle = 3.7m/s^2 (planète Mars)
- Distance horizontale à parcourir = trois (3) mètres (à la surface de Mars)
- Type de saut : trajectoire balistique
- Angle de décollage = 53° (correspond à l'angle nécessaire pour effectuer un saut balistique d'une portée de 3 mètres et atteignant un maximum vertical de 1 mètre)
- Course verticale maximale du mécanisme (Δy) = 96 mm

Hypothèses :

- Frottement dans le mécanisme négligé
- Résistance de l'atmosphère négligée

L'énergie d'impulsion en joules est donnée par l'équation suivante;

$$E = \frac{m \cdot g \cdot d}{2 \sin(2\theta)} \quad (5-1)$$

Où :

E = Energie en joules

m = Masse du robot en Kg

g = Accelération gravitationnelle = $3.7 \frac{m}{s^2}$ (sur Mars)

d = Distance horizontale à parcourir en mètres

θ = Angle d'attaque (deg)

Rappel;

$$E (joules) = \frac{1 \text{ kg} \cdot 3.7 \frac{m}{s^2} \cdot 3 \text{ m}}{2 \sin(2 \cdot 53^\circ)}$$

$$E = 5.78 \text{ joules}$$

L'équation de la vitesse effective, en (m/s), nécessaire pour atteindre l'objectif de distance à parcourir se traduit comme suit;

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{m \cdot g \cdot d}{2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)} \quad (5-2)$$

Alors :

$$\text{Vitesse au décollage} \left(\text{en } \frac{m}{s} \right) = \sqrt{\frac{d \cdot g}{\sin(2 \cdot \theta)}} \quad (5-3)$$

$$V = \sqrt{\frac{3 \text{ m} \cdot 3.7 \frac{m}{s^2}}{\sin(2 \cdot 53^\circ)}}$$

$$V = 3.4 \frac{m}{s}$$

Le temps nécessaire pour atteindre la distance horizontale de trois (3) mètres à la surface de Mars est donné par l'équation (5-4).

$$t(sec) = \frac{2 \cdot V \cdot \sin(\theta)}{g} \quad (5-4)$$

$$t(sec) = \frac{2 \cdot 3.4 \left(\frac{m}{s} \right) \cdot \sin(53^\circ)}{3.7 \left(\frac{m}{s^2} \right)}$$

$$t = 1.47 \text{ secondes}$$

Description du mécanisme analysé

La Figure 54 indique les dimensions clés du mécanisme. Les résultats de la simulation dynamique qui suit serviront à dimensionner les ressorts et vérifier la faisabilité en tenant compte des contraintes (paramètres proposés plus haut).

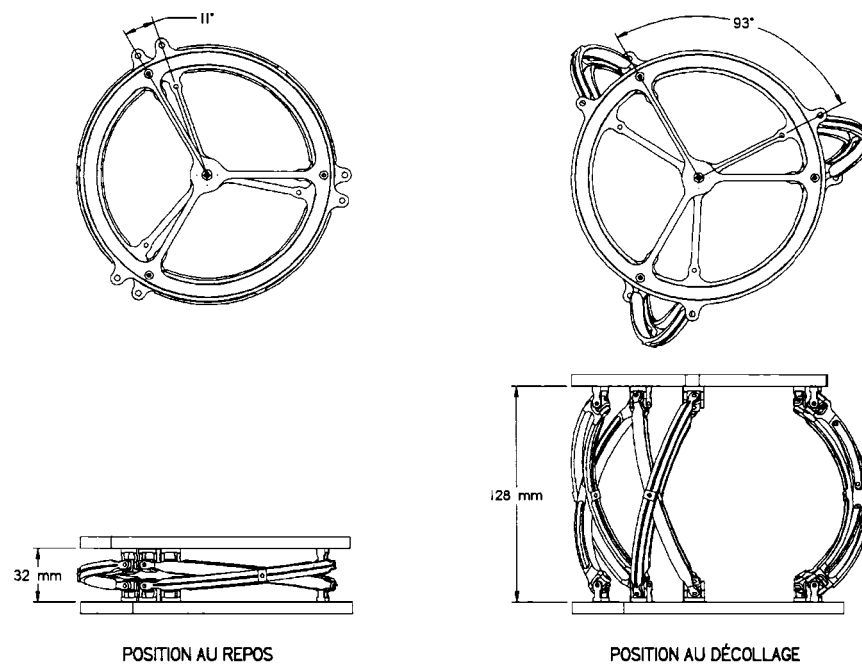


Figure 54 Dimensions générales du mécanisme à ciseaux cylindrique

La distance au cours de laquelle le mécanisme pourra développer son énergie est représentée comme suit :

$$\text{Course totale (m)} = (\text{Hauteur maximale du mécanisme}) - (\text{Hauteur du mécanisme au repos})$$

$$\text{Course totale (mm)} = (128 \text{ mm}) - (32 \text{ mm}) = 96 \text{ mm}$$

Le mécanisme peut donc se déployer sur une distance d'au plus 96 mm. Cette distance (Δy) doit être considérée dans la simulation dynamique qui suit. Il est à noter que la course maximale permise (Δy) du mécanisme principal tient compte de l'ensemble des autres pièces y étant imbriquées, de l'interaction de ces dernières avec le mécanisme principal et du système séquenceur. Ces autres mécanismes seront traités dans les chapitres qui suivent.

Le modèle a été conçu à l'aide du logiciel SolidEdge® V17. La modélisation géométrique est de type "solide". La structure du mécanisme est principalement faite d'aluminium 6061-T6 et comprend quelques rondelles de Teflon® et des goupilles d'acier inoxydable. Chacun des fichiers "pièces" de l'assemblage contient l'information sur la masse, le volume et l'inertie de cette dernière. Afin de bien visualiser les mouvements et les possibles interférences lors du déploiement, un modèle physique (prototype préalablement décrit à la section 5.2) a été construit. Ce modèle a été fabriqué à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique et le code régissant les parcours d'outils a été généré à partir du logiciel Mastercam®. Une fois le modèle de l'assemblage construit dans SolidEdge®, il a été importé dans Dynamic Designer pro® aux fins de simulation.

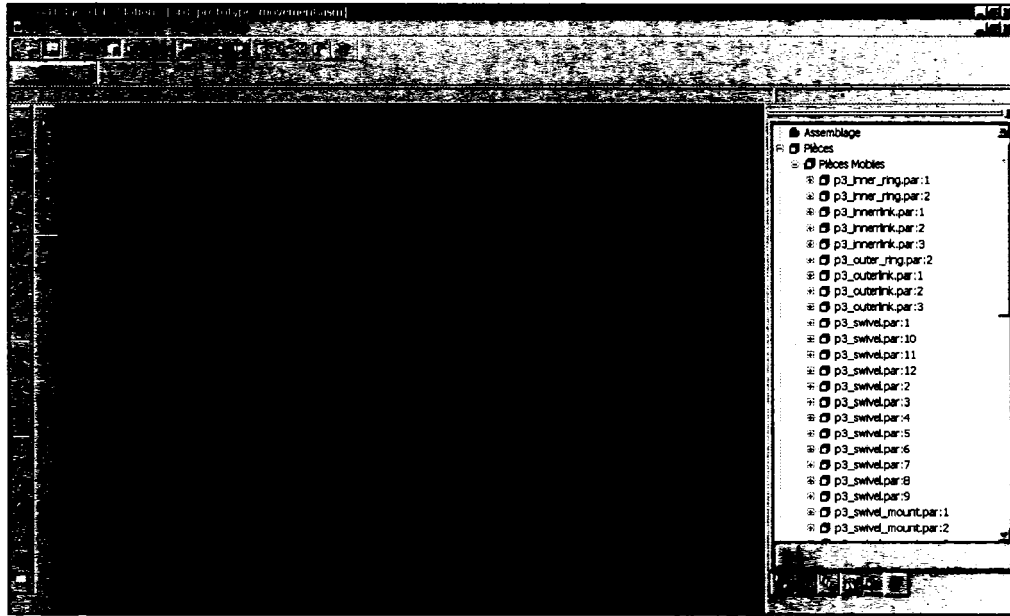


Figure 55 Environnement de MSC Dynamic Designer pro®

Description de la simulation

Une fois le modèle transféré dans Dynamic Designer pro®, les pièces mobiles et les pièces fixes ont été définies et des ressorts ont été insérés. La simulation a été rendue possible en fixant le pied, ou plateau circulaire, au sol. Le mécanisme, au temps zéro, se retrouve en position comprimée et l'ajout de ressorts de torsion entre les plateaux rotatifs permet au mécanisme de se déployer. La masse correspondant aux instruments scientifiques et aux autres composantes faisant partie du robot a été déposée sur le plateau circulaire supérieur.

Des calculs préliminaires permettent de dimensionner grossièrement les ressorts. Cependant, le frottement dans les joints universels ainsi que dans le reste du mécanisme n'est pas considéré.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(\beta)^2 \quad (5-5)$$

Alors :

$$k = \frac{2E}{(\Delta\beta)^2} = \frac{2E}{(\beta_i)^2 - (\beta_f)^2} \quad (5-6)$$

Afin de maximiser le ratio "force/masse" du ressort principal ainsi que pour des raisons géométriques, il a été décidé d'utiliser ce dernier au maximum de sa plage de déformation. Ce qui signifie que lorsque le saut est imminent, le ressort est comprimé sur 180° , correspondant à l'angle β_i . Tandis que lorsqu'il arrive en fin de course, il demeure comprimé de 98° ($180^\circ - 82^\circ$), correspondant à β_f .

Donc :

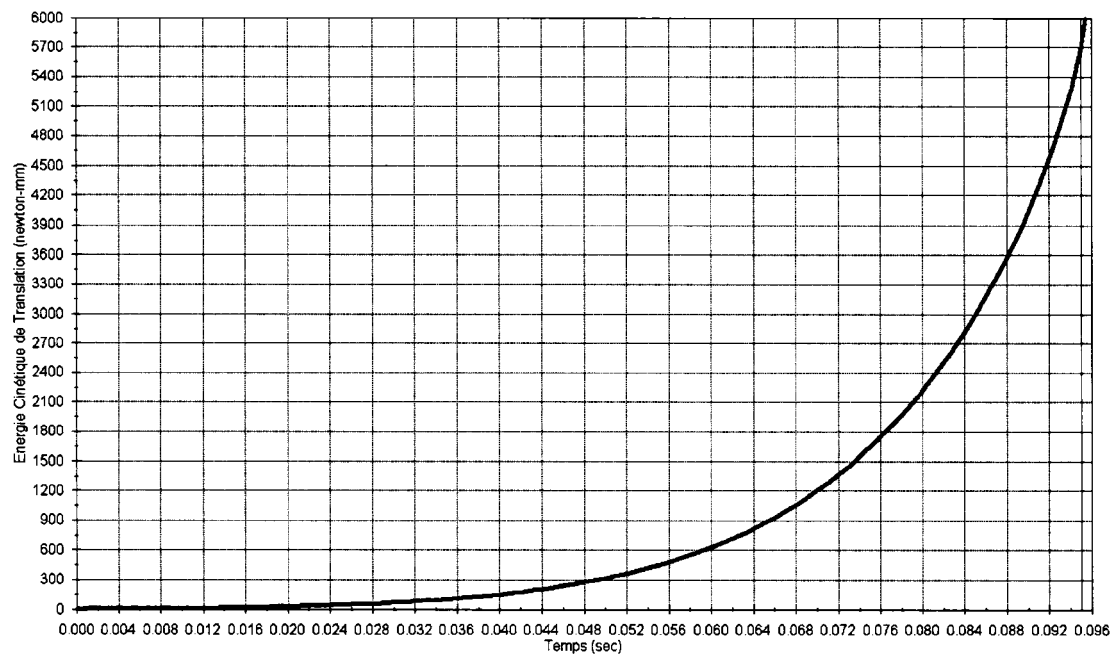
$$k = \frac{2 \cdot 5.78J}{\left(\frac{180^\circ \cdot 2\pi}{360}\right)^2 - \left(\frac{98^\circ \cdot 2\pi}{360}\right)^2}$$

$$k = 1.675 \frac{Nm}{rad} = 0.03 \frac{Nm}{deg} = 30 \frac{Nmm}{deg}$$

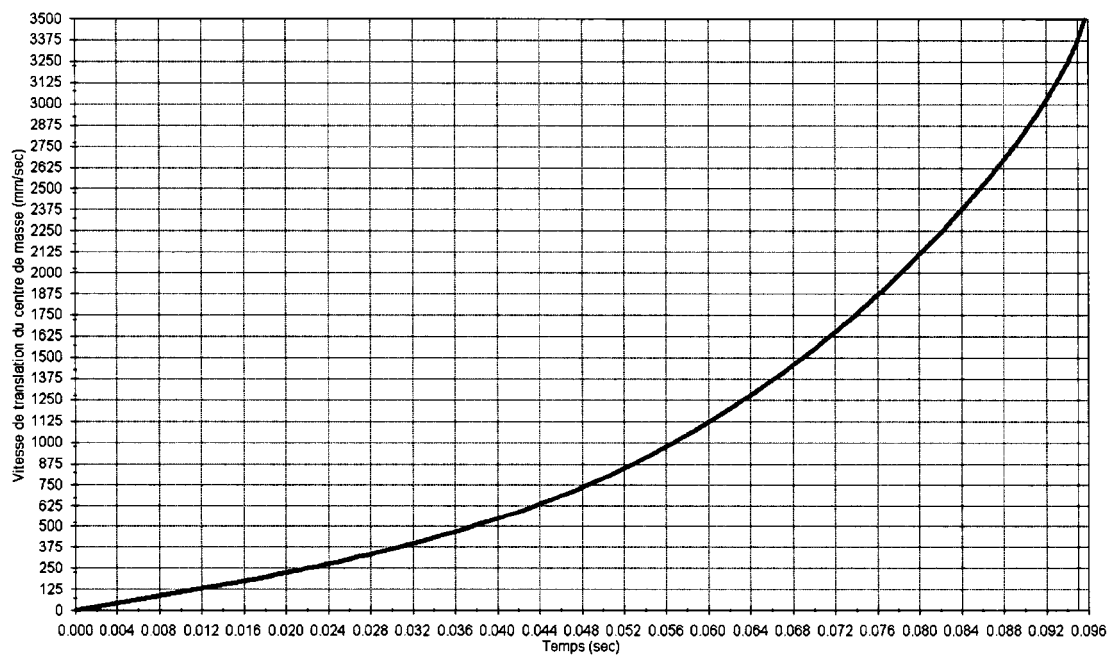
Par la suite, en faisant légèrement varier la constante de raideur de ces derniers, et en simulant le déploiement du mécanisme, les courbes d'énergie cinétique de translation et les courbes de vitesse du centre de masse du robot ont pu être tracées. Le dimensionnement préliminaire des ressorts, capable de développer l'énergie nécessaire de 5.78 joules, a donc été validé.

Résultats de l'analyse

Le Graphique 8 présente l'énergie cinétique générée pendant l'ascension, depuis le temps zéro, jusqu'à la fin de la course (c.-à-d. décollage) alors que la courbe présentée sur le Graphique 9 décrit la vitesse du centre de masse du robot, toujours en fonction du temps. Il est à noter que la ligne rouge correspond à l'instant de décollage.



Graphique 8 Énergie cinétique (N-mm) en fonction du temps



Graphique 9 Vitesse du centre de masse du robot (mm/s) en fonction du temps

Pour des fins de simulation, et telles que présentés dans les calculs préliminaires, les deux ressorts prévus (c.-à-d. celui reliant les plateaux du bas et celui reliant les plateaux du haut) ont été remplacés par un seul. Ceci fait en sorte que la raideur nécessaire pourra être divisée en deux lors de la sélection des ressorts. Le ressort a été modélisé suivant les vraies conditions. Il s'agit, tel que mentionné précédemment, d'un ressort de torsion de 180° de course angulaire. À la position initiale (c.-à-d. au temps zéro), le ressort est sous tension maximale. Ce qui signifie qu'il est comprimé sur toute sa course (180°). Une fois la simulation lancée, le ressort se relâche pour permettre l'extension du mécanisme jusqu'à ce que ce dernier atteigne la butée de fin de course.

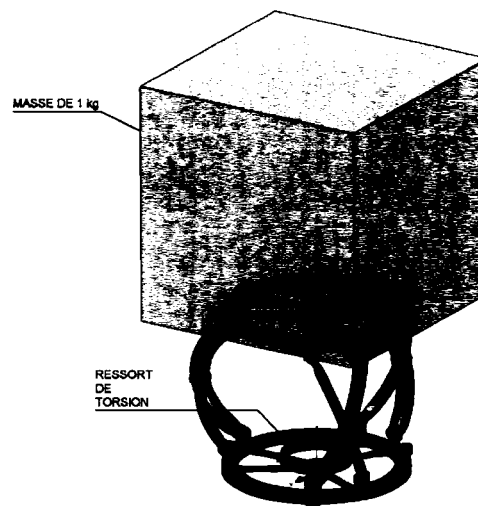


Figure 56 Environnement de simulation: mécanisme à l'instant du décollage

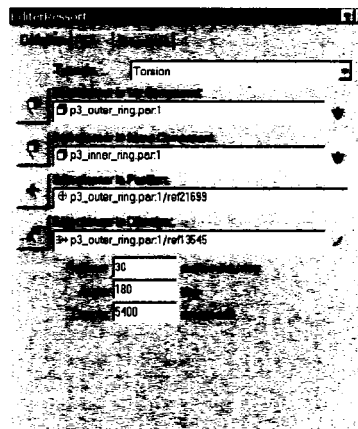
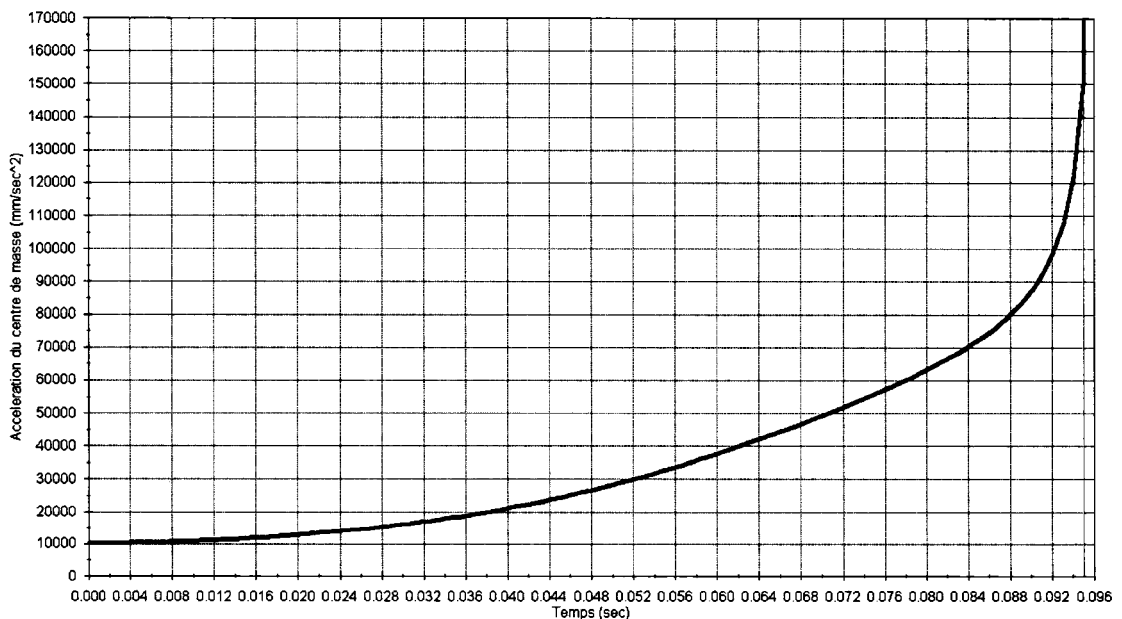


Figure 57 Environnement de simulation (fenêtre des paramètres régissant le ressort)

5.4 Discussions et résultats

Dans le but d'obtenir une quantité d'énergie suffisante pour produire un saut d'une distance équivalente à trois (3) mètres à la surface de Mars, tout en prenant en considération les prérequis de conception tels que la masse, le volume à respecter et la course maximale permise du mécanisme, le ressort de torsion devrait avoir une raideur égale ou supérieure à 30 Nmm/degré. Cette valeur ne tient pas compte du frottement relatif aux mouvements dans les joints universels. La courbe d'énergie cinétique présentée sur le Graphique 8 démontre que le saut pourrait se produire de façon prématurée car la butée de fin de course est atteinte en pleine ascension du mécanisme. La vitesse maximale atteinte au temps $t=0.095$ seconde, correspond à la vitesse minimum nécessaire ($v=3.4$ m/s) pour réaliser le saut de trois (3) mètres préalablement prescrit. La courbe présentée sur le Graphique 10 montre l'accélération du centre de masse (m/s^2) pendant toute la durée du déploiement. La ligne rouge représente l'instant du décollage.



Graphique 10 Accélération du centre de masse (mm/s^2) du robot en fonction du temps

Cette courbe démontre que l'accélération est relativement élevée, ce qui pourrait devenir un problème en présence d'un terrain ayant une valeur de rigidité différente de l'infinie. En effet, comme le sol de Mars est composé de sable, la base du robot risque peut-être de s'enfoncer dans le sable et ainsi réduire la distance parcourue, voire même empêcher le décollage. Il est donc très important de bien positionner la butée d'arrêt qui provoque le saut.

Choix des ressorts

Tel que mentionné précédemment, la conception du mécanisme à ciseaux cylindrique permet l'utilisation de deux ressorts de torsion montés de façon parallèle. Le premier agissant entre les deux (2) plateaux circulaires du bas et le deuxième agissant entre les deux (2) plateaux du haut. Ce qui signifie que la valeur de constante de raideur de 30 Nmm/degé devra être générée par deux (2) ressorts.

$$\text{Constante de rigidité par ressort} = \frac{30 \frac{\text{Nmm}}{\text{deg}}}{2 \text{ ressorts}} = 15 \frac{\text{Nmm}}{\text{deg}}$$

CHAPITRE 6

CONCEPTION DE L'ACTIONNEUR À ALLIAGE À MÉMOIRE DE FORME (AMF)

6.1 Général

Maintenant que le mécanisme déployable a été conçu et que la raideur nécessaire des ressorts de torsion a été quantifiée, un actionneur utilisant les changements de température journaliers à la surface de la planète Mars comme source d'énergie doit être conçu. La Figure 58 montre les principaux éléments faisant parties de ce mécanisme [1].

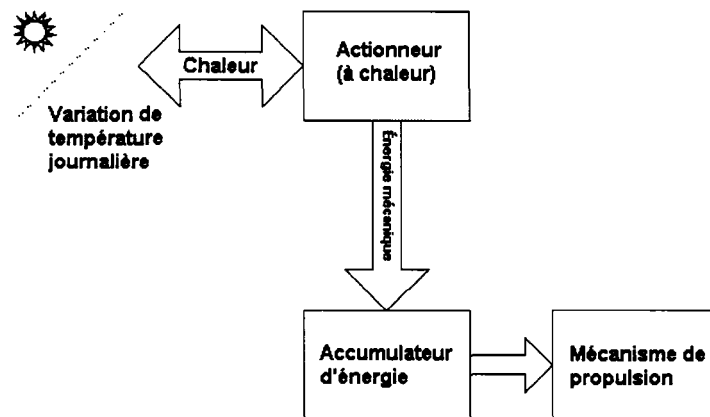


Figure 58 Diagramme montrant les principaux éléments faisant partie d'un système utilisant la chaleur comme source d'énergie

La solution choisie est un actionneur à alliage à mémoire de forme (AMF). Les alliages à mémoire de forme ont la propriété de pouvoir mémoriser une forme préalablement déterminée. Ce même alliage, une fois déformé à froid, d'une façon apparente à une déformation plastique, pourra retrouver sa forme originale ou sa forme de référence à chaud par un chauffage à une température au-dessus de ce qu'on appelle la température "seuil". L'effet appelé "mémoire de forme" repose sur l'existence d'une transformation de phase réversible de type martensitique thermo-élastique. Il s'agit

d'une modification de la structure cristalline entre un état structural à haute température appelé "austénite" et un autre état structural à basse température appelé "martensite".

Voici une liste d'alliages ayant la capacité de "mémoire de forme" et leurs propriétés :

ITEM	Ni-Ti	Cu-Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Melting point (°C)	1250	1020	1050
Density (Kg/m³)	6450	7900	7150
Electrical Resistivity ($\Omega \cdot m \cdot 10E-6$)	0.5-1.1	0.07-0.12	0.1-0.14
Thermal Conductivity, RT (W/m²K)	10-18	120	75
Thermal Expansion Coeff. (10E-6/K)	6.6-10	17	17
Specific Heat (J/Kg°K)	490	390	440
Transformation Enthalpy (J/Kg)	28.000	7.000	9.000
E-modulus (GPa)	95	70-100	80-100
UTS, mart. MPa)	800-1000	800-900	1000
Elongation at Fracture, mart. (%)	30-50	15	8-10
Fatigue Strength N=10E+6 (MPa)	350	270	350
Grain size (m°10E-6)	20-100	50-150	30-100
Transformation Temp. Range (°C.)	-100 to +110	-200 to -110	-150 to +200
Hysteresis (K)	30	15	20
Max one-way memory (%)	7	4	6
Normal two-way memory (%)	3.2	8	1
Normal working Stress (MPa)	100-130	40	70
Normal number of thermal cycles	+100 000	+10 000	+5 000
Max. Overheating Temp. (°C)	400	150	300
Damping capacity (SDC %)	20	85	20
Corrosion Resistance	Excellent	Fair	Good
Biological Compatibility	Excellent	Bad	Bad

Figure 59 Propriétés des alliages à mémoire de forme

Pour la présente application, l'utilisation d'un alliage de nickel et titane (Ni-Ti) ayant un changement de phase approprié aux températures attendues à la surface de Mars a été envisagé. Ce choix est principalement basé sur la disponibilité de ce dernier sur le marché, sa faible densité, ses qualités superélastiques ainsi que sa résistance à la corrosion. Dans le cas des alliages Ni-Ti, la déformation maximale que le matériau peut subir de façon répétée sans pour autant être déformé "plastiquement", correspond à 8 %. Pour certains alliages, cette valeur peut être légèrement inférieure, mais rarement au-dessous de 4 %. Ce qui signifie qu'un fil de Ni-Ti de 100 mm de long pourra être rétréci de 4 à 8 mm une fois chauffé au-dessus de la température "seuil",

Comme des ressorts de torsion sont utilisés comme accumulateur d'énergie et qu'un mouvement rotatif permet au mécanisme de se déployer et de se contracter, il a été prévu, afin de simplifier le problème, d'utiliser un système rotatif comme actionneur.

Les critères importants à considérer pour la conception sont : l'espace disponible, le couple, et le déplacement angulaire nécessaire.

6.2 Conception et description

En se basant sur le mécanisme à ciseaux cylindrique présenté à la section 5.2, l'espace disponible pour l'actionneur AMF a été évalué. Pour ce faire, les hypothèses suivantes ont été posées :

- 2 actionneurs (un situé dans le haut et un situé dans le bas du mécanisme).

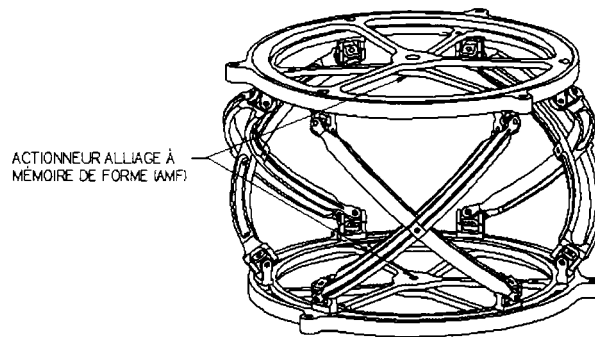


Figure 60 Vue isométrique du mécanisme "sauteur" principal

- Les actionneurs doivent être confinés à l'intérieur du mécanisme : $\varnothing_{\max} \approx 120\text{mm}$
- Hauteur maximale disponible pour les 2 actionneurs : 31.7mm

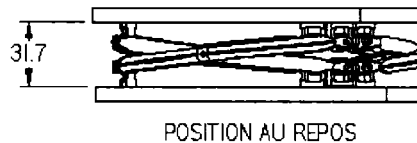


Figure 61 Vue de côté du mécanisme "sauteur"

- Pour une bonne couverture géographique en fonction de la latitude et des saisons, une température de transition autour de -40° est appropriée.
- L'actionneur doit générer assez de couple pour comprimer les ressorts de torsion choisis.

Il existe plusieurs façons de concevoir un actionneur à alliage à mémoire de forme. La façon la plus simple pour réaliser ce type d'actionneur, réside dans le principe du moteur fonctionnant à la chaleur ou "Heat engine". Généralement linéaire, ce type d'actionneur réagissant aux variations de température est formé de deux (2) ressorts travaillant en opposition. Le premier ressort est fait d'alliage à mémoire de forme et le second est un ressort classique. Lorsque le ressort AMF se réchauffe, il se rétrécit jusqu'à sa position "mémoire", tirant ainsi sur le second ressort. Lorsque ce même ressort AMF se refroidit, il devient plus facile à déformer et tend même à s'allonger. Dans cette phase, c'est le ressort classique qui tire sur le premier. Pour de faibles déplacements, l'action d'exposer ce type d'actionneurs à des cycles de température (chaud-froid) aura pour effet de générer un mouvement de va-et-vient à la jonction des deux ressorts, tel que montré dans la figure qui suit :

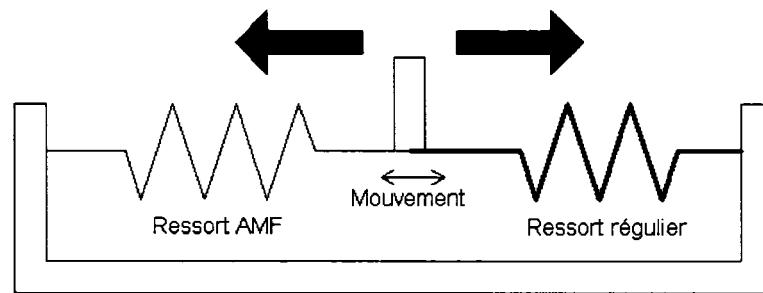


Figure 62 Schéma simplifié d'un actionneur AMF linéaire

Ce système doit cependant être adapté afin de réaliser le travail en rotation au lieu de travailler de façon linéaire. Pour ce faire, le remplacement des ressorts linéaires par des ressorts de torsion est possible. Par contre, il est démontré que le fait d'utiliser les fils AMF sous forme de ressort réduit considérablement la force ou le couple pouvant être générée par ces derniers [11].

La Figure 63 illustre, de façon conceptuelle, l'utilisation d'un moteur à chaleur pour remonter un mécanisme à rochet :

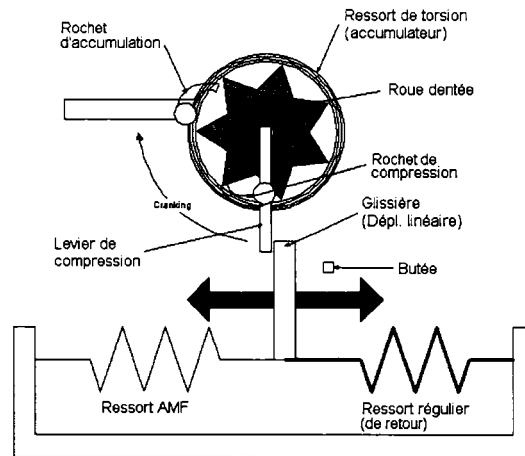
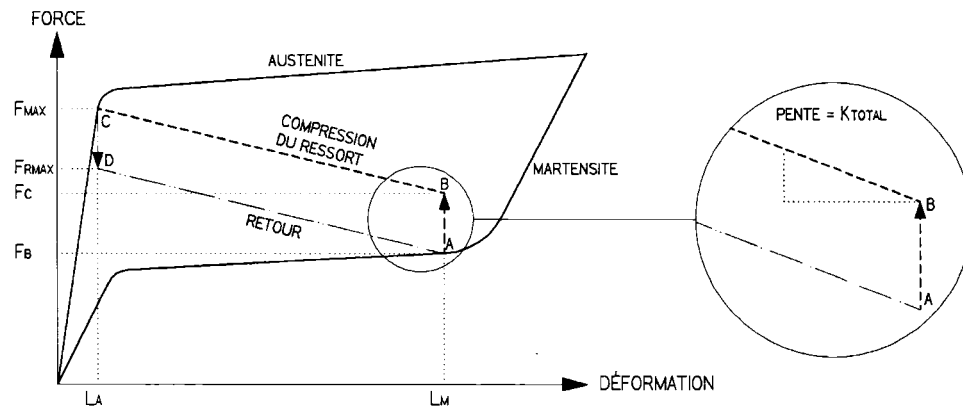


Figure 63 Concept d'actionneur AMF accumulant l'énergie et basé sur plusieurs cycles de températures (Adapté de Pierre Allard –ASC)

Au départ, à basse température, c'est-à-dire à une température en dessous de la température de transition martensitique, la glissière est attirée du côté droit par le ressort de retour. Lorsque la température à la surface de la planète se réchauffe pour passer au-dessus de la température austénitique, la glissière entre en contact avec le levier de compression pour déplacer ce dernier dans le sens des aiguilles d'une montre. Le rochet de compression s'engage dans la roue dentée pour faire tourner cette dernière dans le même sens. Lorsque la température redescend sous le seuil martensitique, le rochet d'accumulation empêche la roue dentée et par conséquent, le ressort de torsion, de revenir dans le sens antihoraire donc, à leurs positions initiales. À chaque cycle de température, le mécanisme fera tourner la roue dentée, qui à son tour, accumulera de l'énergie dans le ressort de torsion.

Le Graphique 11 montre le cycle typique d'un actionneur AMF, tel qu'illustré à la Figure 63.



Graphique 11 Courbe typique des forces et déformations de l'actionneur AMF (Agence spatiale canadienne)

Les hypothèses suivantes sont posées pour analyser le comportement du mécanisme et de l'actionneur :

- Le couple nécessaire pour comprimer le ressort de torsion (accumulateur) demeure constant tout au long du déplacement.
- La force appliquée par la glissière de l'actionneur sur le levier de compression demeure constante tout au long du déplacement.
- La friction dans tous les mouvements est négligeable.
- Le ressort de retour servant de rappel au ressort AMF suit la loi de Hooke.
- Les jeux mécaniques dans tous les mécanismes sont négligeables.

Transition de froid à chaud

Au départ (point A), le mécanisme est froid et le ressort AMF est allongé de la longueur L_M par l'action de la force initiale de rappel (retour) F_B . Une butée prévient une trop grande élongation du ressort AMF (voir la Figure 63). La constante de raideur du ressort de rappel, K_R , et la déformation initiale B_R de ce dernier, sont choisies de façon

à procurer une force suffisante pour allonger le ressort AMF d'une valeur maximale de 4 % à 6 %. Cette valeur correspond à la déformation maximale permise.

Nous obtenons donc :

$$F_B = k_R (B_R) \quad (6-1)$$

Au fur et à mesure que le système se réchauffe (Graphique 11-courbe bleue), la force générée par la contraction du ressort AMF deviendra plus grande que la force générée par le ressort de rappel $F_{RP}(L)$ ce, jusqu'à ce que la glissière atteigne le levier de compression (point B). La force générée par le ressort de rappel est donc exprimée comme suit :

$$F_{RP}(L) = k_R (L + B_R) \quad (6-2)$$

Pendant la transition du point B au point C, la force générée par le ressort AMF doit compenser le ressort de rappel $F_{RP}(L)$ et la force de l'accumulateur (ressort de torsion) F_C . La force appliquée sur le ressort AMF " $F_{RH}(L)$ " est donc décrite par l'équation suivante :

$$F_{RH}(L) = F_{RP}(L) + F_C \quad (6-3)$$

En intégrant les deux dernières équations, une nouvelle équation est obtenue :

$$F_{RH}(L) = k_R (L + B_R) + F_C \quad (6-4)$$

Le travail mécanique, $W_{B \rightarrow C}$ produit par le ressort AMF pendant la transition du point B au point C est donné par l'équation suivante :

$$W_{B \rightarrow C} = \int_{L_M}^{L_A} F_{RH}(L) dL \quad (6-5)$$

Puisque la force générée par l'accumulateur d'énergie (ressort de torsion) est considérée comme étant constante sur tout le déplacement, l'équation suivante est obtenue :

$$W_{B \rightarrow C} = \int_{L_M}^{L_A} F_{RH}(L) dL = F_C(L_A - L_M) + \int_{L_M}^{L_A} F_{RP}(L) dL \quad (6-6)$$

$$\Rightarrow W_{B \rightarrow C} = F_C(L_A - L_M) + \int_{L_M}^{L_A} k_R(L + B_R) dL \quad (6-7)$$

$$\Rightarrow W_{B \rightarrow C} = F_C(L_A - L_M) + k_R B_R(L_A - L_M) + \frac{1}{2} k_R (L_A^2 - L_M^2) \quad (6-8)$$

La force maximale F_{MAX} que le ressort AMF doit compenser est donc donnée par :

$$F_{max} = F_C + F_{RP}(L_M) = F_C + k_R(B_R + L_M) \quad (6-9)$$

Transition de chaud à froid

Au fur et à mesure que le ressort AMF se refroidit, il est tiré par le ressort de rappel. Le levier de compression vient qu'à se déplacer dans le sens antihoraire par l'accumulateur d'énergie (ressort de torsion) jusqu'à ce que le rochet d'accumulation s'engage dans une dent de la roue dentée (Graphique 11-point D).

Pendant la phase de transition du point D au point A, seul le ressort de rappel agit sur le ressort AMF produisant ainsi une force dite "de rappel" $F_{RP}(L)$ allongeant l'actionneur AMF jusqu'à ce que la glissière entre en contact avec la butée d'arrêt.

Le travail mécanique $W_{D \rightarrow A}$ produit par le ressort AMF pendant la phase de transition du point D au point A est donné par l'équation suivante :

$$W_{D \rightarrow A} = \int_{L_A}^{L_M} k_R (L + B_R) dL = -k_R B_R (L_M - L_A) - \frac{1}{2} k_R (L_A^2 - L_M^2) \quad (6-10)$$

Travail mécanique disponible

À mesure que le ressort AMF s'étire et se contracte avec les variations de température, un travail mécanique est produit et emmagasiné sous forme d'énergie potentielle dans l'accumulateur d'énergie (ressort de torsion). L'énergie disponible par le cycle thermique est la somme du travail produit par le ressort AMF sur toute la durée de ce cycle.

Alors :

$$E_{cycle} = W_{B \rightarrow C} + W_{D \rightarrow A} \Rightarrow E_{cycle} = F_C (L_A - L_M) \quad (6-11)$$

Tel que mentionné précédemment, l'utilisation d'un ressort AMF comparativement à un fil AMF droit permet d'obtenir un déplacement plus élevé de l'actionneur. En revanche, la force générée par ce ressort sera réduite par rapport à un fil AMF droit. À titre d'exemple, regardons, pour un même diamètre de fil AMF et un diamètre arbitraire et réaliste de ressort, la différence au niveau des forces atteignables :

Selon Hodgson et Brown [11], pour un ressort AMF hélicoïdal,

$$F_{RH} (N) = 876 \cdot \frac{d}{D/d} \quad (6-12)$$

Où :

d = Diamètre du fil AMF (mm)

D = Diamètre effectif du ressort (mm)

Pour l'application proposée et basé sur l'enveloppe disponible, le ressort utilisé devra avoir un diamètre égal ou inférieur à 17 mm (voir les prérequis et hypothèses de conceptions de l'actionneur présentés au début de la présente section).

Alors :

Pour un diamètre de Fil AMF de 0.5 mm (0.020"), l'équation suivante est obtenue :

$$F_{RH}(N) = 876 \cdot \frac{0.5mm}{17mm/0.5mm} = 12.88 N$$

Alors que pour un fil AMF droit, la force maximale obtenue :

$$F_{FD}(N) = S \times A \quad (6-13)$$

Où :

S = Contrainte de déformation maximale permise (MPa)

A = Section du fil (mm²)

Il est à noter que la contrainte de déformation maximale permise dans le cas d'un alliage à mémoire de forme varie selon le type de procédé de formage utilisé et l'alliage choisit. Cette valeur varie entre 172 Mpa (25000 PSI), dans le cas d'un alliage Ni-Ti standard, jusqu'à 689 Mpa (100000 PSI), dans le cas d'un alliage spécial et additionné d'éléments pour augmenter sa résistance mécanique. Pour la présente étude, il est judicieux de demeurer conservateurs en utilisant la valeur de contrainte la plus basse.

Alors :

$$F_{FD}(N) = 172 MPa \times \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 172 MPa \cdot \pi \left(\frac{0.5 mm}{2} \right)^2 = 33.77 N$$

$$F_{RH} \ll F_{FD}$$

La Figure 64 contient un tableau montrant les propriétés des fils AMF en Ni-Ti pour différents diamètres :

Wire Diameter	Resistance (Ohms/in.)	Minimum Pull Force	Approx. Current to Contract in 1 sec.* at 21°C	Contraction as a % of Length	On Time for 70°C Wire	On Time for 90°C Wire
0.001"	45.0	7 grams	20 mA	4%	0.1 sec.	0.06 sec.
0.0015"	21.0	17 grams	30 mA	4%	0.25 sec.	0.09 sec.
0.002"	12.0	35 grams	50 mA	4%	0.3 sec.	0.1 sec.
0.003"	5.0	80 grams	100 mA	4%	0.5 sec.	0.2 sec.
0.004"	3.0	150 grams	180 mA	4%	0.8 sec.	0.4 sec.
0.005"	1.8	230 grams	250 mA	4%	1.6 sec.	0.9 sec.
0.006"	1.3	330 grams	400 mA	4%	2.0 sec.	1.2 sec.
0.008"	0.8	590 grams	610 mA	4%	3.5 sec.	2.2 sec.
0.010"	0.5	930 grams	1,000 mA	4%	5.5 sec.	3.5 sec.
0.012"	0.33	1,250 grams	1,750 mA	4%	8.0 sec.	6.0 sec.
0.015"	0.2	2,000 grams	2,750 mA	4%	13.0 sec.	10.0 sec.

Figure 64 Propriétés mécaniques des fils AMF pour différents diamètres (SMA inc.)

Il est à remarquer que même si l'alliage de Ni-Ti utilisé avait une valeur de contrainte de déformation très basse (ex. 172 MPa), pour un même diamètre de "fil" AMF droit, la force développée par ce dernier est largement supérieure à celle pouvant être obtenue par un "ressort" AMF. Pour cette raison, le concept d'actionneur retenu utilise un fil AMF droit en tension plutôt qu'un ressort AMF hélicoïdal.

Compte tenu de l'enveloppe géométrique disponible pour l'actionneur AMF, en plus d'être restreint à une hauteur de 17 mm, l'assemblage complet de ce dernier doit entrer dans un cylindre ayant un diamètre d'au plus 120 mm.

Le système d'actionneur AMF qui a été développé, s'inspire du concept illustré à la Figure 63, avec la différence d'être basé sur un mouvement de rotation. Cette décision a été prise dans le but de satisfaire les contraintes géométriques et de permettre de recharger le mécanisme "sauteur" en un (1) seul cycle quotidien.

Le point le plus important à considérer concerne le couple "élevé", que l'actionneur doit développer, pour comprimer le ressort de torsion servant d'accumulateur d'énergie. Un mécanisme est conçu pour tirer profit des propriétés d'un fil AMF droit soit : un faible taux d'élongation (4 %-6 %), et une capacité de force en tension très élevée en fonction

du diamètre du fil. Un système d'enroulement permet d'utiliser la longueur de fil nécessaire pour obtenir un déplacement angulaire de 120° en un seul cycle de température, dans un volume compact.

Afin de connaître la longueur de fil Ni-Ti nécessaire, de même que le diamètre que ce dernier doit avoir pour développer la force (couple) minimum, il est nécessaire d'utiliser la constante de raideur du ressort de torsion servant d'accumulateur. Tel que discuté plus tôt, toujours dans le but de simplifier la conception et de minimiser les forces locales exercées sur le robot, il a été prévu d'utiliser deux (2) systèmes d'actionneurs similaires. Le premier étant situé sur les plateaux rotatifs du haut, et le deuxième étant situé sur les plateaux rotatifs du bas. Il est donc nécessaire de poser l'hypothèse qu'il y aura deux ressorts de torsion (accumulateurs).

Le couple maximum devant être développé par ressort, se produira au début de l'amorce pour le saut. En effet, à ce moment, le ressort de torsion est sous tension car comprimé de 180° ,

$$\tau_{MAX} = k_{\theta} \cdot \Delta\theta \quad (6-14)$$

où :

k_{θ} = Constante de rigidité du ressort de torsion principal

$\Delta\theta$ = Angle de compression initial du ressort (avant le déploiement)

$$\tau_{MAX} = 0.015 \frac{N-m}{deg} \cdot 180^\circ = 2.7 Nm$$

La force pouvant être développée par un fil AMF est gouvernée par l'équation suivante :

$$F_{FD}(N) = S \times A \quad (6-15)$$

où :

S = Contrainte de déformation maximale permise (Pa)

A = Section du fil (m^2)

Comme l'élongation pouvant être développée par un fil AMF droit est directement proportionnelle à sa longueur initiale, il est donc primordial d'avoir une idée du "design" ainsi que de l'espace disponible pour ce dernier. Le présent ouvrage propose un système qui peut, en un seul et unique cycle de température, générer assez de déplacement et de force pour être capable de complètement recharger l'accumulateur.

Un tambour servira d'intermédiaire entre l'actionneur AMF et le ressort en torsion servant à accumuler l'énergie nécessaire au saut. Ce concept est illustré à la Figure 65.

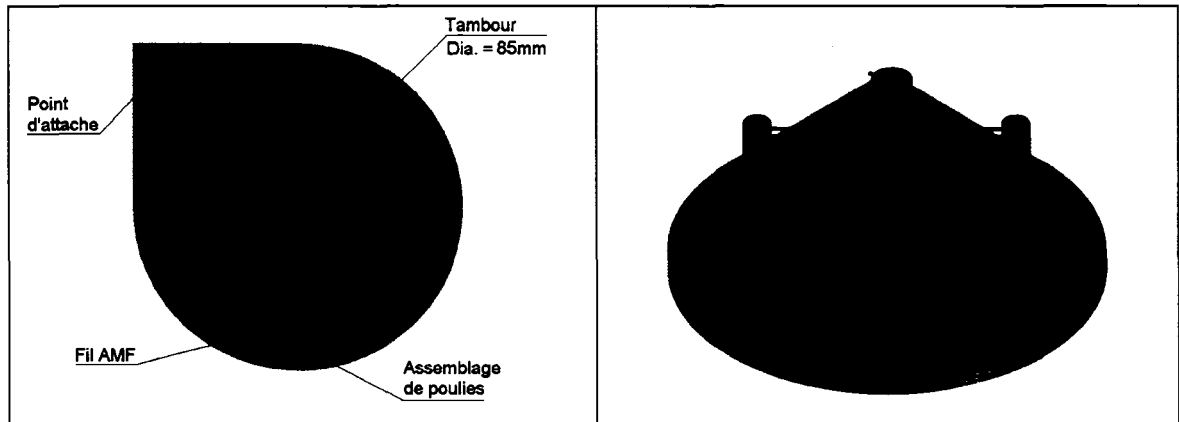


Figure 65 Modèle 3D du prototype d'actionneur AMF conçu

Basé sur la géométrie du mécanisme de propulsion, incluant l'accumulateur, ainsi que sur l'espace disponible à l'intérieur de ce dernier, il a été évalué que le tambour peut avoir un diamètre maximal de 85 mm.

La force de tension maximale appliquée par le fil AMF peut être calculée comme suit :

$$F_{FIL} = \frac{\tau_{MAX}}{r_T} = \frac{2.7 \text{ Nm}}{0.0425 \text{ m}} = 63.53 \text{ N}$$

Donc, tel que mentionné dans le guide "using Nitinol Alloys" produit par SMA inc. [11], pour un fil Ni-Ti ayant une température de transition aux alentours de -40° , la contrainte de déformation maximale peut facilement atteindre 50 000 PSI (345 Mpa), alors :

$$63.53 \text{ N} = 345 \times 10^6 \text{ Pa} \times A_F (m^2)$$

$$A_F (m^2) = \frac{63.53 \text{ N}}{345 \times 10^6 \text{ Pa}} = 1.84 \times 10^{-7} m^2$$

$$D_F (m) = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_F}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1.84 \times 10^{-7}}{\pi}} = 2.42 \times 10^{-4} \text{ m} \approx (0.24 \text{ mm})$$

Le Fil AMF devrait donc avoir un diamètre de 0.24 mm, ce qui correspond à environ 0,010". Basée sur la géométrie présentée plus haut, la longueur nécessaire permettant d'obtenir le déplacement souhaité du tambour est basée sur le fait que ce dernier a un diamètre de 85 mm, et qu'il doit tourner d'un angle de 82° (Figure 54). L'élongation minimum "typique" d'un AMF correspond à 4 % de la longueur initiale, alors :

$$\varepsilon (mm) = \frac{82^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi \cdot r_T \quad (6-16)$$

Où :

$$r_T = \text{Rayon du tambour} = 42.5 \text{ mm}$$

Alors :

$$\varepsilon (mm) = \frac{82^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi \cdot 42.5 \text{ mm} = 60.82 \text{ mm}$$

La longueur totale de fil peut être calculée comme ceci :

$$\varepsilon (mm) = 60.82mm = \frac{4}{100} \cdot L_F (mm) \quad (6-17)$$

$$L_F (mm) = \frac{60.82mm \cdot 100}{4} = 1520.6 mm \approx 1.52 m$$

Le fil AMF doit donc avoir une longueur initiale d'environ 1.52 mètres afin de permettre un déplacement angulaire du tambour de 82°. Ceci nécessite un système d'enroulement permettant d'installer la longueur de 1.52 mètres nécessaire de fil AMF droit, dans le volume prescrit. Cependant, puisqu'il est impraticable d'enrouler plus d'un tour sur le tambour, l'utilisation de poulies situées tout autour de ce dernier est nécessaire. En fait, tel que présenté à la Figure 65, le fil AMF préalablement attaché au châssis du robot passerait par une série de poulies pour finalement s'attacher au tambour.

Le nombre de poulies nécessaires est dicté par le nombre de tours imposé par la longueur du fil AMF. La Figure 66 illustre la configuration des poulies et du tambour de l'actionneur à trois (3) poulies, tel que conçu.

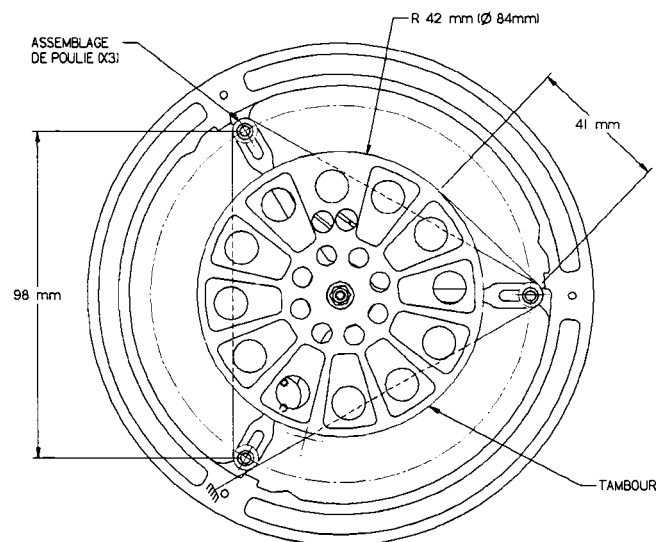


Figure 66 Vue de dessus du prototype d'actionneur AMF avec dimensions

En considérant que le fil AMF sera enroulé d'un tour sur le tambour et que la distance la plus courte séparant les poulies est de 98 mm :

$$L_F = 0.041m + 2\pi \cdot r_T + [(3 \cdot 0.098m) \cdot N_{TOUR}] \quad (6-18)$$

Où :

$$r_T = 0.0425 \text{ m}$$

N_{TOUR} = Nombre de tour passant dans les poulies

Alors :

$$1.52m = 0.041m + 2\pi \cdot 0.0425m + [(3 \cdot 0.098m) \cdot N_{TOUR}]$$

Donc :

$$N_{TOUR} \approx 4$$

Ce qui signifie que le fil AMF devra faire quatre (4) tours dans les poulies avant de s'enrouler autour du tambour.

Les poulies utilisées devront être conçues en conséquence. En effet, comme l'alliage Ni-Ti n'est pas très flexible dans sa phase élastique, le rayon de courbure minimum requis pour l'enroulement à travers les poulies devra être considéré. De plus, des assemblages d'au minimum quatre (4) poulies superposées devront être disposés tout autour du tambour afin de pouvoir loger la longueur de fils AMF nécessaire.

Un prototype respectant globalement les dimensions régies par l'enveloppe disponible a été réalisé. Ce prototype a été fabriqué dans le but premier de valider la fonctionnalité du système et ainsi vérifier si l'actionneur peut générer le déplacement voulu. Bien qu'il diffère légèrement de la version finale à trois (3) assemblages de poulies, ce prototype contient la totalité du fil nécessaire, soit 1.52 mètres. Pour simplifier les essais, le choix s'est arrêté sur un alliage Ni-Ti ayant une température de transition dans les alentours de 60°C au lieu d'environ -40°C tel que devrait être le cas dans la version dédiée à la planète Mars.

La Figure 67 montre un prototype de l'actionneur à AMF :



Figure 67 Photographie de l'actionneur AMF prise pendant les essais

L'image montre le prototype à l'essai sous l'effet de la chaleur générée par le pistolet à air chaud. Bien qu'il soit difficile de faire en sorte que le fil atteigne sa température de transition sur toute sa longueur (c.-à-d. obtenir l'équilibre), les essais ont toutefois été très concluants en ce qui concerne le déplacement angulaire prévu du tambour. Les essais ont permis d'obtenir le déplacement prévu d'environ 82° , ce qui vient confirmer la longueur totale de fil AMF droit nécessaire. Il est à noter que les matériaux utilisés dans la fabrication de ce prototype sont l'aluminium 6061-T6 pour la base et le tambour alors que les poulies ont été fabriquées en Delrin®. L'utilisation du Delrin® sert en fait à découpler, de façon thermique, le fil AMF du reste de l'assemblage.

CHAPITRE 7

CONCEPTION DU SYSTÈME DE REDRESSEMENT

7.1 Général

Le système de redressement est requis pour remettre le robot en position verticale après l'atterrissage. En effet, dans le concept proposé jusqu'à présent, le robot culbute après l'atterrissage et peut se retrouver dans n'importe quelle orientation. Pour ce faire, il a été décidé d'utiliser une structure ayant la forme d'un tétraèdre. La face du tétraèdre à laquelle est fixé le mécanisme sauteur est définie comme la base. Les trois (3) autres surfaces de la pyramide sont équipées de pétales permettant de redresser le robot peu importe son orientation (voir la Figure 68).

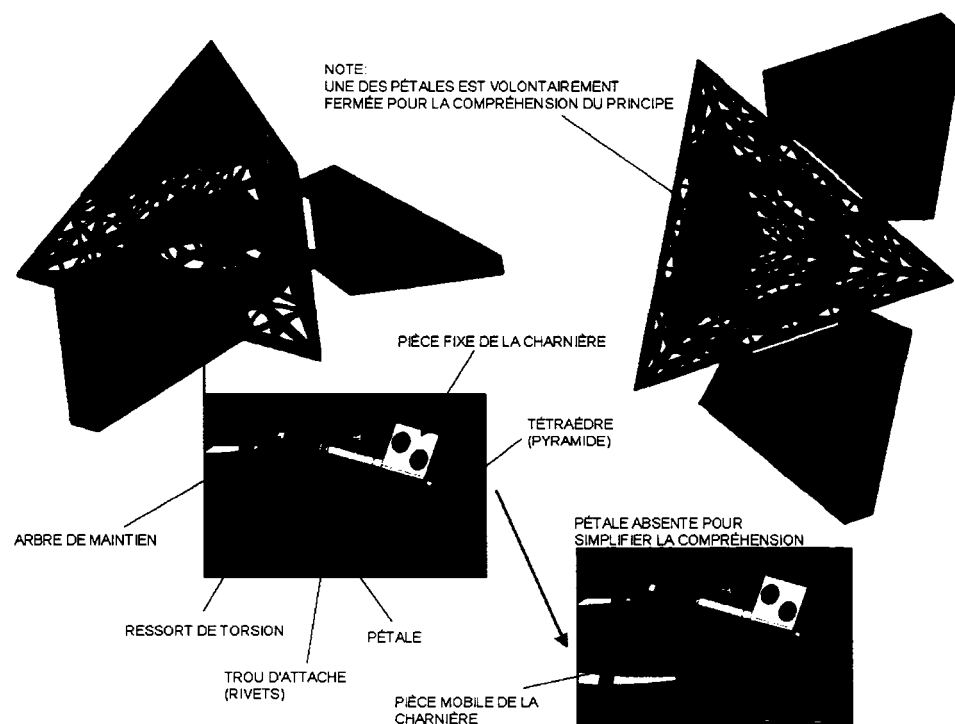


Figure 68 Image montrant les pétales et leurs mécanismes de déploiements sur la structure primaire (pyramide)

7.2 Conception détaillée et explications

7.2.1 Structure primaire (châssis)

Bien que le pied "sauteur" (mécanisme à ciseaux cylindrique) soit fixé sur le plan de référence qui se trouve à la base de la pyramide, une fois intégré, ce dernier sera confiné à l'intérieur de la structure afin d'en assurer la protection lors de l'atterrissage.

Le tétraèdre doit, une fois les pétales refermés, pouvoir contenir l'ensemble des mécanismes faisant partie du robot, dans leurs configurations correspondant au "saut imminent"²³. Le modèle "refermé" du mécanisme à ciseau est donc utilisé pour déduire les dimensions de la pyramide. Il a été choisi d'utiliser un tétraèdre régulier composé de quatre (4) surfaces triangulaires équilatérales. Un seul paramètre régit donc toutes les dimensions du tétraèdre, à savoir, la longueur de l'arête des triangles.

En tenant compte de la hauteur d'environ 50 mm du mécanisme à ciseaux cylindrique une fois rétracté, et en ajoutant un peu de jeu tout autour du cercle de 150 mm décrit par ce dernier, il a été déduit que la structure de la pyramide devait être formée de quatre (4) triangles ayant des arêtes d'au moins 350 mm de côté (incluant l'épaisseur de la structure).

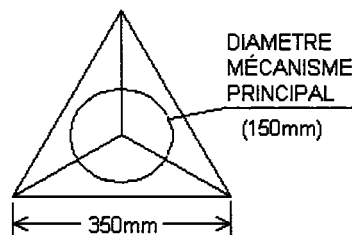


Figure 69 Schématisation du mécanisme "sauteur" intégré dans la pyramide de 350 mm de côté

Le système de redressement est composé de trois (3) panneaux minces, appelés pétales, et recouverts de cellules photovoltaïques (cellules solaires). Chacun de ces

²³ Juste avant que le robot ne commence son déploiement en vue d'un saut.

pétales est monté sur un pivot tel qu'illustré à la Figure 68. Le système est aussi composé d'une structure primaire dite "fixe" ayant comme premier mandat de supporter l'impact d'atterrissage mais aussi, de maintenir les trois (3) pétales en place et de supporter toutes les composantes faisant partie du robot (instruments scientifiques, pied "sauteur", charnières, etc.). C'est ce même châssis qui deviendra éventuellement la référence d'assemblage donc, la pièce maîtresse du "design".

La structure fixe est composée de quatre (4) plaques triangulaires. Dans le cas du premier prototype, cette structure, sous forme de treillis, est faite d'aluminium 6061-T6. Ces quatre (4) plaques triangulaires sont maintenues les unes sur les autres en utilisant des cordons de soudure. Un système de montage et de fixation (fixture) a été prévu afin de permettre l'assemblage de façon précise.

Ce châssis est fixé au mécanisme à ciseaux cylindrique au moyen de trois points d'attache situés sur le pourtour d'un anneau usiné à même la base de cette structure. Trois séparateurs ou "espaceurs" sont nécessaires pour faire le lien entre un des plateaux supérieurs du mécanisme sauteur (section 5.2) et la structure primaire tel que montré sur la Figure 70. Ces séparateurs sont, eux aussi, faits en aluminium 6061-T6 et leur longueur a été déterminée de façon à permettre au mécanisme à ciseaux d'être confiné à l'intérieur de la structure primaire.

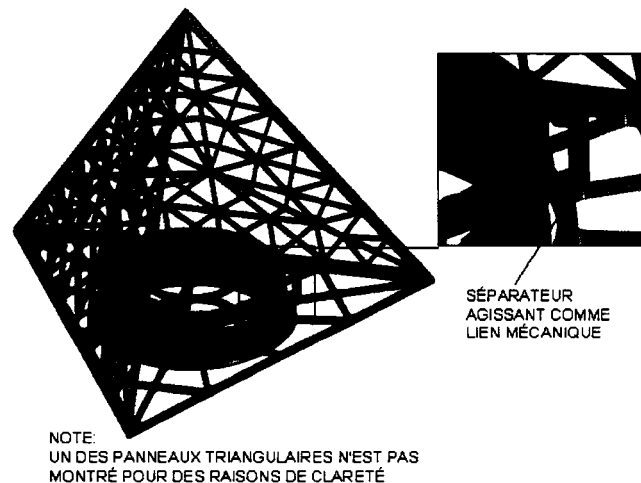


Figure 70 Mécanisme à ciseaux cylindrique attaché à l'intérieur de la structure primaire par les séparateurs

7.2.2 Système de pétales et fonctionnalités

Les pétales sont conçus pour s'harmoniser aux faces du tétraèdre en position fermée. La base de chaque pétale est attachée à la pyramide au moyen de charnières munies de ressort les retenant en position "fermée". Les pétales doivent s'ouvrir simultanément pour redresser le robot dans la bonne configuration après l'atterrissage et se refermer immédiatement avant le prochain saut. De cette façon, elles permettront de recharger les batteries par des cellules photovoltaïques y étant installées et ce, pendant toute la période d'ensoleillement quotidienne. Dans le but de générer le déplacement nécessaire à l'ouverture des pétales, il a été prévu d'utiliser l'actionneur AMF déjà conçu et discuté plus haut (voir section 6.2).

Le mécanisme comprend deux charnières disposées de chaque côté de chacun des pétales. Un arbre de maintien agit comme point de pivot des charnières et est enrobé d'un ressort de torsion qui sert à refermer le pétale sur la pyramide. Le ressort est orienté de façon à tenir le pétale "normalement fermé" le long de la pyramide. Les ressorts de torsion, les vis et les rivets nécessaires à l'intégration sont des composantes disponibles sur le marché et elles sont toutes faites en acier inoxydable (316) alors que l'arbre, lui aussi fait d'acier inoxydable, a été fabriqué spécialement pour l'application, de même que les pièces mobiles et fixes faisant partie des charnières. Notons que ces pièces mobiles et fixes qui composent les charnières sont faites en aluminium 6061-T6. Les dessins de fabrication de ces pièces de même que toutes les autres présentées plus haut, sont disponibles en annexe.

Les pétales qui composent le premier prototype sont de minces panneaux d'aluminium d'un (1) mm (0,040") d'épaisseur. Ces derniers sont faits d'aluminium 6061-T6 et découpés de façon à obtenir la forme adéquate.

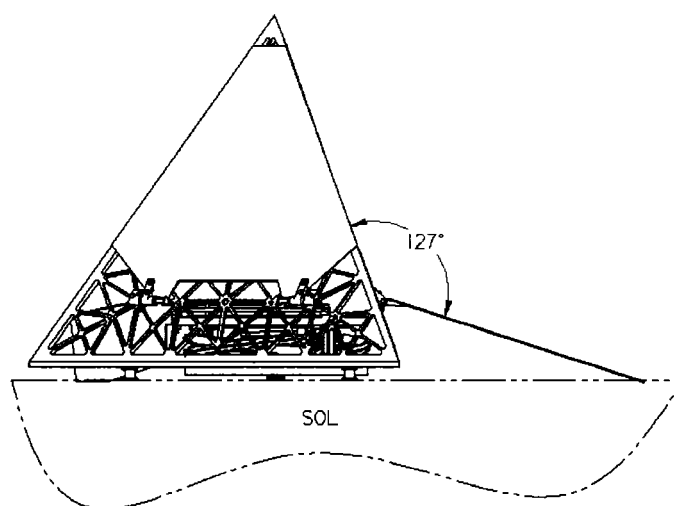


Figure 71 Vue d'élévation du robot sauteur avec un des pétales ouverts

Dans le but de simplifier le "design", les charnières des pétales sont installées à la hauteur des plateaux supérieurs du mécanisme sauteur (voir la Figure 72). En supposant qu'un déploiement jusqu'au sol est nécessaire, la Figure 71 montre que l'angle d'ouverture des pétales est d'environ 127° .

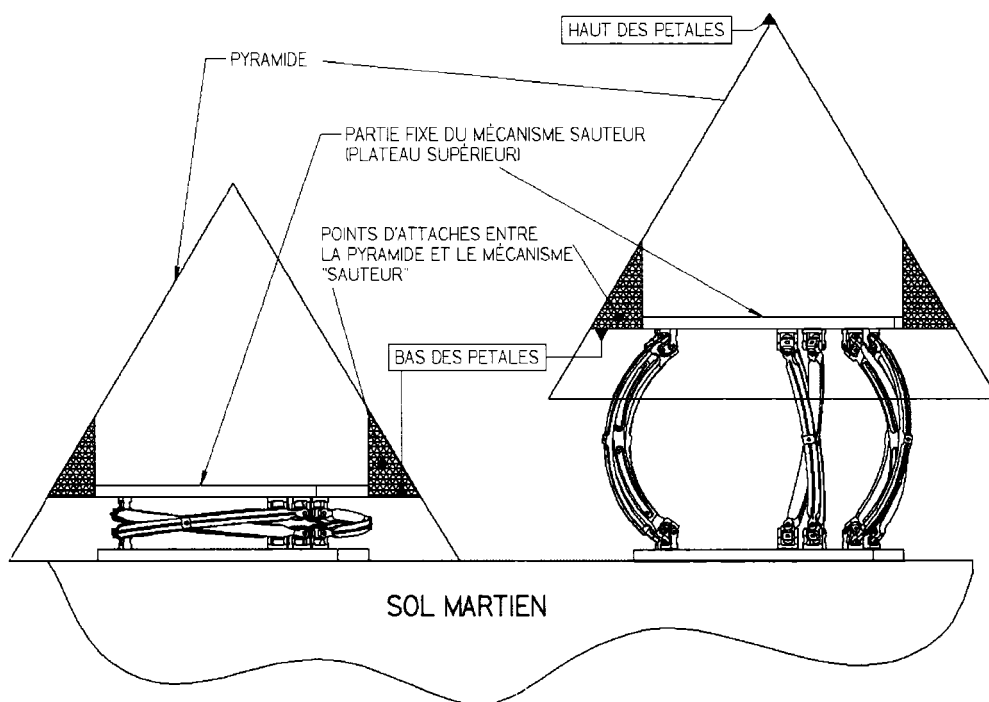


Figure 72 Positionnement de la pyramide par rapport au mécanisme principal

Dans le but de n'utiliser qu'un seul actionneur AMF pour répondre à toutes les fonctions du robot, il a été décidé d'utiliser les assemblages de poulies servant à enrouler le fil AMF (discuté à la section 6.2) pour déployer les pétales. C'est notamment dans le but de rendre cette technique possible, qu'il a été décidé d'enlever un des quatre (4) assemblages de poulies (voir la Figure 65). La distance séparant ces poulies a donc été ajustée afin de pouvoir disposer la longueur nécessaire de fil AMF correspondant à 1.52 mètres.

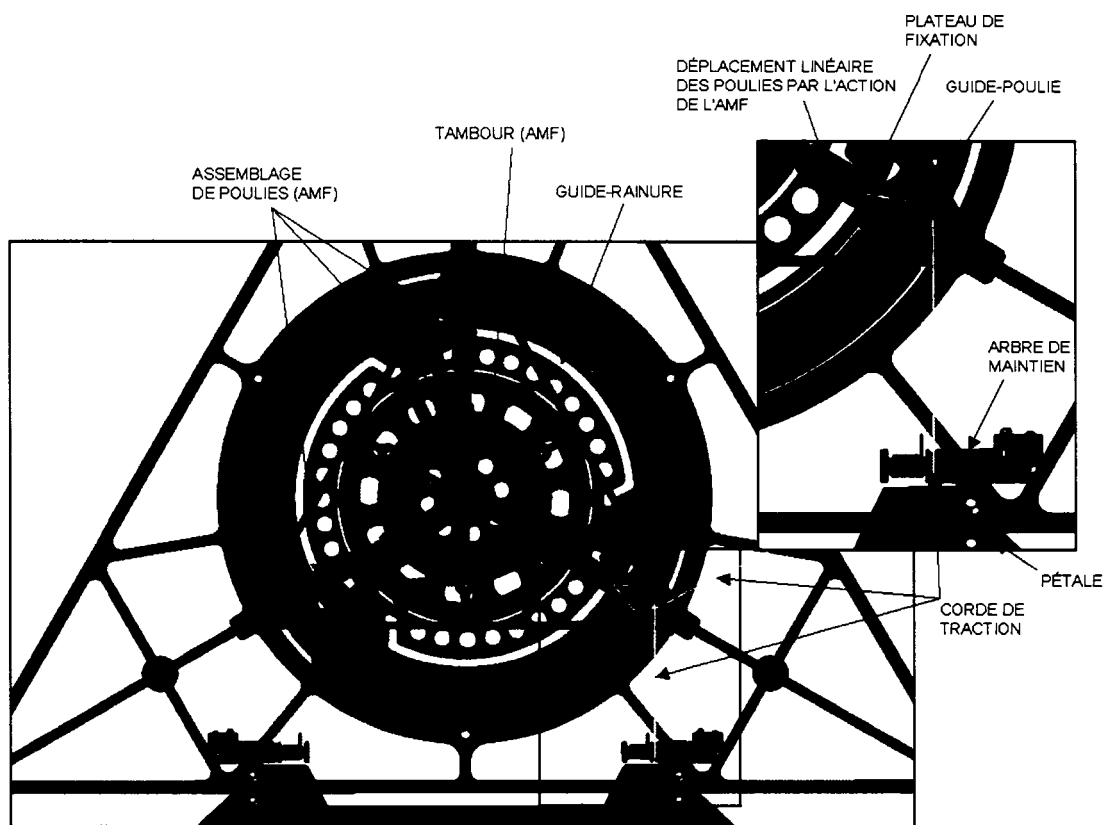


Figure 73 Vue de dessus montrant l'intérieur du robot sauteur

Tel que mentionné plus haut, le simple fait de faire rétrécir la longueur du fil AMF en le chauffant a pour effet de faire tourner le tambour. Par contre, au lieu de fixer les assemblages de poulies, tel que présenté auparavant, ces derniers ont été assemblés de façon à permettre un déplacement linéaire depuis leurs positions de départ vers le centre du tambour (voir encadré de la Figure 73). En limitant ce déplacement

par une rainure de glissement située dans la plaque de fixation, et agissant comme butée de fin de course, nous obtenons un système "séquenceur". En effet, au début du cycle thermique, les assemblages de poulies sont à leur position la plus éloignée. Une fois le réchauffement engagé, un plateau comportant une rainure et sur lequel est monté le tambour AMF, subit une rotation visant à recharger le mécanisme principal mais aussi faire déplacer les assemblages de poulies dans les rainures de la plaque de fixation vers le centre du tambour (Figure 73). Cette action a pour effet de tirer sur les cordes de traction. Une fois que les assemblages de poulies atteindront l'extrémité de la rainure, elles s'arrêteront, et le déplacement du fil AMF pourra entièrement être utilisé pour faire tourner le tambour, finalisant ainsi la recharge du mécanisme "sauteur" principal.

La plaque de fixation sert d'interface entre le mécanisme à ciseaux cylindrique et le châssis du robot. Cette même plaque, situé à l'intérieur de la pyramide servira à attacher les instruments scientifiques de bord tout en accommodant les guides-poulies²⁴. Ces guides-poulies servent à disposer et guider convenablement les cordes de traction jusqu'aux arbres de maintien des charnières. Ces cordes de traction sont ensuite enroulées, puis fixées aux arbres. Le déplacement linéaire de l'extrémité de ces cordes génère donc un couple sur l'arbre de maintien des charnières pour faire ouvrir les pétales de redressement. Comme il est nécessaire d'utiliser des cordes (câbles) afin de transmettre le mouvement de translation des assemblages de poulies aux charnières, la décision de travailler dans un seul plan a été prise. En effet, le fait de faire parcourir les cordes de tractions dans le plan de référence du plateau de fixation triangulaire simplifie considérablement l'assemblage, et diminue le risque de perdre le synchronisme dans l'ouverture des pétales.

Ces pétales doivent se refermer avant le saut. C'est pourquoi un autre disque, muni de "guides-rainures" (voir la Figure 74), et ayant plusieurs autres fonctions qui seront expliquées plus tard a été intégré au "design". Ce disque, tel que mentionné plus haut, tourne suivant l'action rotative de l'actionneur AMF.

²⁴ Poulies fixes montées, de façon rigide, sur la structure du robot

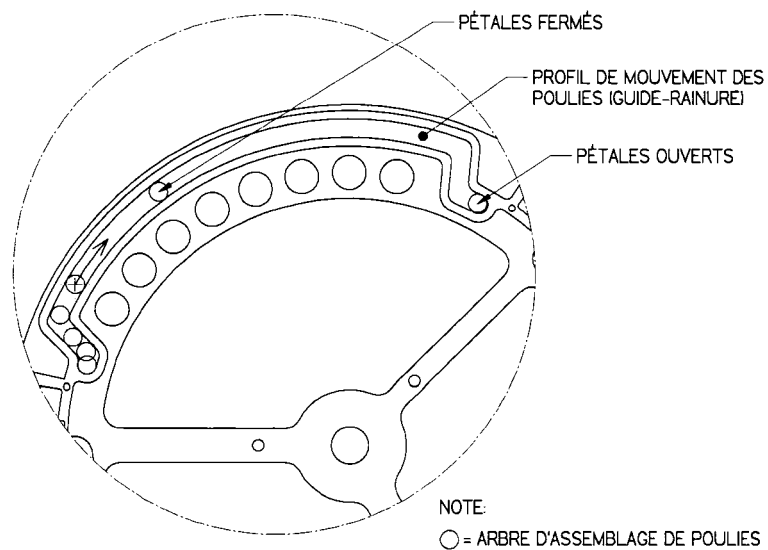


Figure 74 Plateau intermédiaire supérieur et profil de mouvement suivi par les assemblages de poulies

La géométrie (forme et dimensions) de la partie de l'arbre de maintien sur laquelle est enroulée la corde de traction dépend de l'angle de déploiement de 127° et du déplacement possible des assemblages de poulies situés tout autour du tambour. Ce déplacement est dicté par la longueur de la rainure située dans la plaque de fixation. La Figure 75 montre le plateau de fixation ainsi que la rainure qui régit le déplacement possible des poulies, par glissement.

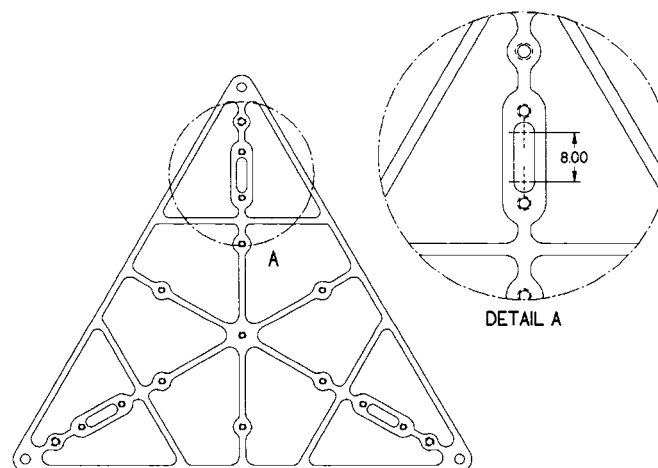


Figure 75 Plateau de fixation et rainure servant de guide aux assemblages de poulies

La dimension de 8 mm correspond au déplacement maximal des poulies avant qu'elles n'entrent en contact avec le tambour. Afin que la force de tension produite par le déplacement des assemblages de poulies soit constante, il a été décidé de concevoir une pièce ayant la forme d'une came, sur laquelle la corde de traction sera enroulée.

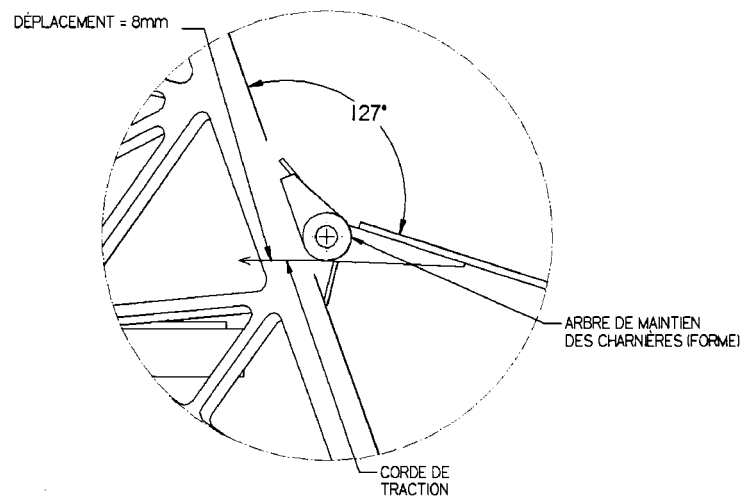


Figure 76 Schéma expliquant le système de traction pour l'ouverture des pétales

Regardons les forces qui définissent le redressement du robot et la forme que devrait prendre l'arbre de maintien des charnières afin de permettre un déploiement de 127° de ces dernières, si le déplacement généré par la corde de traction correspond à 8 mm.

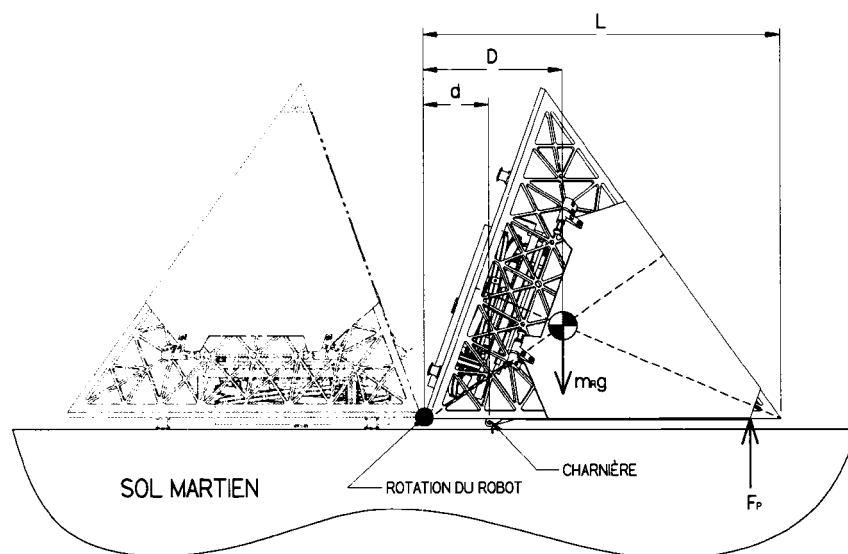


Figure 77 Principales forces régissant le redressement du robot sauteur

Le couple à appliquer sur les charnières du pétale pour redresser le robot est calculé en utilisant les hypothèses suivantes :

- Sol parfaitement rigide
- Le centre de masse du robot se situe en son centre géométrique
- Le pétale est parfaitement rigide
- Le point de rotation (*Pt. R*) du robot se situe à sa base (Figure 78) pendant toute la durée du redressement
- Un seul des trois (3) pétales agira sur le redressement

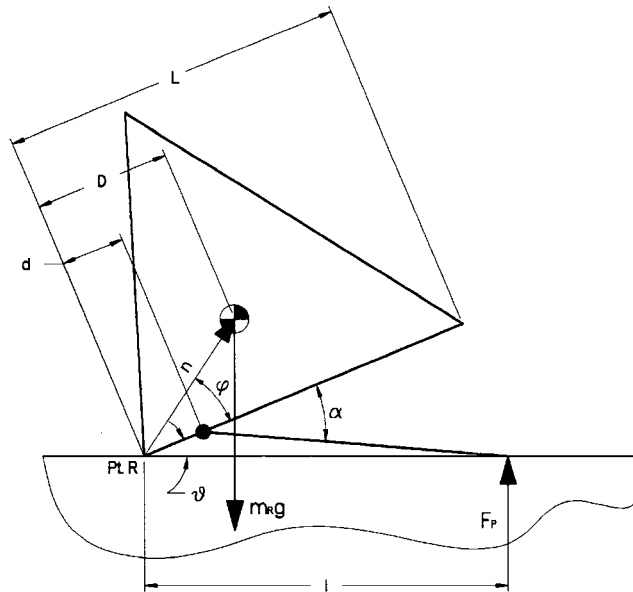


Figure 78 Diagramme des forces et distances utilisées pour les calculs relatifs au redressement

$$l = \sqrt{d^2 + (L-d)^2 + 2d(L-d)\cos(\alpha)} \quad (7.1)$$

$$\vartheta = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{(L-d)^2}{l^2} \cdot \sin^2(\alpha)} \right) \quad (7.2)$$

$$\sum M_{Pt.R} = 0 = -m_R g \cdot n \cos(\varphi + \vartheta) + F_p \cdot l = 0 \quad (7-3)$$

Où :

m_R = Masse du robot (1.3 Kg)

F_P = Force appliquée au sol par le pétale (N)

g = Accélération gravitationnelle sur Mars ($3.7 \frac{m}{s^2}$)

Alors :

$$F_P = m_R g \frac{n \cos(\varphi + \vartheta)}{l} \quad (7-4)$$

Comme:

$$\tau_H = F_P \cdot (L - d) \cos(\alpha - \vartheta) = T_C \cdot r_H \quad (7-5)$$

Où :

τ_H = Couple généré dans la charnière (Nm)

T_C = Tension dans la corde de traction (N)

r_H = Rayon de l'arbre de la charnière (m)

Donc :

$$\tau_H = m_R g \frac{n \cos(\varphi + \vartheta)}{l} \cdot (L - d) \cdot r_H \quad (7-6)$$

En utilisant les équations (7-4) à (7-6), et basé sur un déplacement possible de 8 mm de la corde de traction, il est possible de déduire la forme de la came sur laquelle sera enroulé cette même corde. Cette came permet d'obtenir une force (T_C) nécessaire constante tout au long du déploiement de 127° du pétale qui, tel que mentionné précédemment, sera généré par le déplacement des assemblages de poulies. Comme chaque assemblage de pétale comprend deux (2) charnières et que ces charnières sont reliées à une corde de traction, la force (T_C) peut donc être divisée par deux.

La force totale (T_T) pouvant être développée par l'actionneur AMF, est la résultante et agit comme suit sur le système :

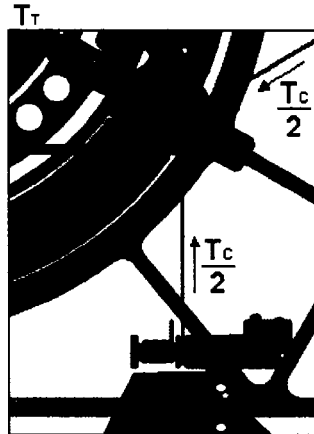


Figure 79 Redistribution des forces dans les cordes de tractions du système de redressement

En posant l'hypothèse supplémentaire que la force (T_{SMA_T})²⁵ pouvant être générée par le fil AMF lors de son réchauffement (au début du changement de phase) est parfaitement redistribuée dans le système et qu'aucun frottement n'y est présent, la tension maximale (T_c) pouvant être développée dans la corde de traction dépend uniquement de l'actionneur AMF présenté plus haut (section 5.2).

Pour ce faire, il faut aussi poser l'hypothèse que la force totale (T_{SMA_T}) sera, en totalité, utilisée par les charnières. Les forces sont transmises par les assemblages de poulies de la façon présentée à la Figure 80.

²⁵ $T_{SMA_T} = F_{FIL}$ (Conception du mécanisme AMF)

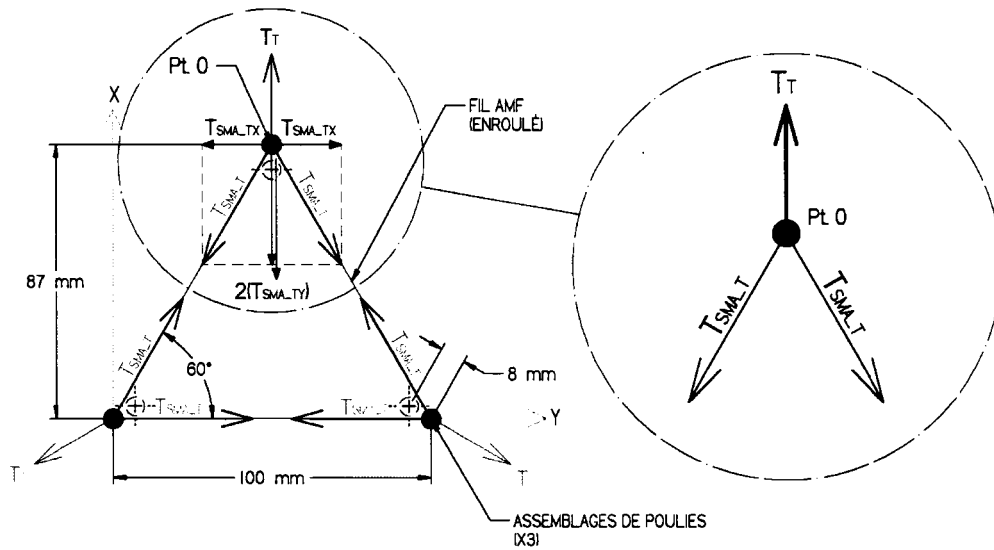


Figure 80 Diagramme des forces agissant sur les assemblages de poulies sous l'action du fil AMF

Où :

$$T_{SMA_T} = F_{FIL} = 63.53 \text{ N}$$

Alors :

$$T_{SMA_TY} = T_{SMA_T} \cdot \cos(30^\circ) = 63.53 \cdot \cos(30^\circ)$$

$$T_{SMA_TY} = 55.02 \text{ N}$$

Donc :

$$T_T = 2 \cdot T_{SMA_TY}$$

$$T_T = 110.04 \text{ N}$$

La force (T_C) disponible pour les charnières, en incluant une marge de sécurité (MS) de 2, est donc déterminée suivant l'expression :

$$\frac{T_T}{MS} = \frac{110.04 \text{ N}}{2} = 2 \cdot T_C \cdot \cos(60^\circ) \quad (7-7)$$

$$T_C = 55.02 \text{ N}$$

Comme:

$$D = 120 \text{ mm}$$

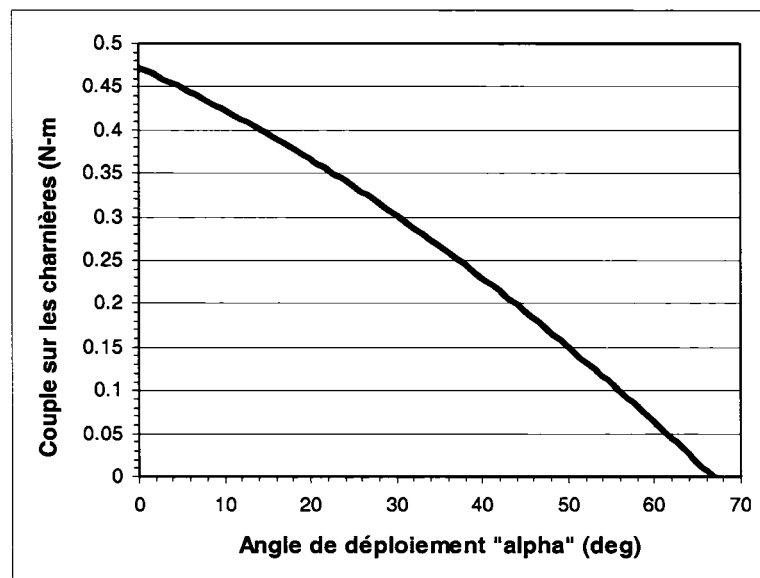
$$d = 55 \text{ mm}$$

$$L = 300 \text{ mm}$$

$$\varphi = 34^\circ$$

$$n = 145 \text{ mm}$$

Le couple (τ_H) à appliquer au niveau des charnières du pétale afin de redresser le robot sera maximum en début de déploiement. Cette valeur maximale correspond à environ 0.472 Nm et sera réduite tout au long du déploiement. Voici une courbe reliant le couple nécessaire (τ_H) en fonction de l'angle de déploiement (α) du pétale :



Graphique 12 Couple nécessaire (Nm) pour redresser le robot sauteur

Sur un terrain parfaitement plat, le déploiement " α " utile de la charnière n'est que d'environ 66°. Cet angle correspond exactement à l'instant où le centre de masse du robot sauteur passe par-dessus le point de pivot "Pt. R" (Figure 78). Lorsque le centre de masse franchit ce point, le robot retombe naturellement sur son socle sous l'effet de la gravité.

Enfin, pour développer le couple nécessaire, le rayon minimum (r_{Hmin}) de la came sur laquelle sera enroulée la corde de traction, correspond à :

$$r_{Hmin} = \frac{\tau_{Hmax}}{T_c} \quad (7-8)$$

$$r_{Hmin} = \frac{0.472 \text{ Nm}}{55.02 \text{ N}} = 0.0085 \text{ m} \quad (= 8.5 \text{ mm})$$

CHAPITRE 8

CONCEPTION DES SOUS-SYSTÈMES ET MÉCANISMES SECONDAIRES ET SÉQUENCE

8.1 Général

Afin de minimiser la masse du système et d'en simplifier l'opération, il a été décidé d'utiliser un seul actionneur AMF pour actionner tous les mécanismes faisant partie du robot. Un système "séquenceur" doit donc être conçu pour permettre à cet actionneur d'effectuer l'ensemble des actions suivantes :

Tableau III

Séquence des opérations du robot sauteur

	Action	Note
0	Atterissage	
1	Ouvrir les pétales	Au début du réchauffement
2	Recharger le ressort principal	Pendant le réchauffement
3	Fermer les pétales	Pendant le réchauffement
4	Libérer l'impulsion nécessaire au déploiement	À la fin du réchauffement
5	Déploiement du mécanisme principal	À la fin du réchauffement
6	Rentrer le pied	Pendant le saut

Tel que présenté au tableau III, l'actionneur AMF débute son cycle en créant un mouvement de translation sur les assemblages de poulies. Ce déplacement entraîne les charnières dans le but d'ouvrir les pétales et ainsi redresser le robot pour le remettre sur son socle. Une fois ces pétales ouverts, les cellules solaires y étant montées rechargent les batteries. Toujours sous l'effet de la chaleur, l'actionneur comprime le ressort de torsion situé dans le pied sauteur. Il est à noter que l'ouverture

des pétales, bien qu'elle se fasse plus rapidement, elle se produit simultanément à la compression du ressort de torsion principal. La recharge du ressort principal a lieu jusqu'à un certain point où l'actionneur se désengage afin de permettre au robot d'amorcer son saut. Juste avant le saut, les pétales se referment alors qu'immédiatement après l'amorce de ce dernier, le mécanisme "sauteur" en fait autant pour prévenir un risque important de dommage relié à l'atterrissage en mode "déployé".

La prochaine section décrit de quelles façons l'actionneur AMF est relié aux différents mécanismes faisant partie de la séquence proposée et quels sont les différents liens régissant leurs mouvements respectifs.

8.2 Conception et description

Afin de simplifier la compréhension, nous allons volontairement omettre, dans les figures qui suivent, certaines pièces du robot qui ne serviraient qu'à alourdir inutilement les concepts et images proposés. Il est toutefois important de mentionner que le robot est muni de deux actionneurs opérants de façon "parallèle". Toutes les composantes, soient les actionneurs AMF, les plateaux intermédiaires de transmission de mouvement et autres composantes qui seront présentées plus tard, sont redondantes et agissent au niveau des plateaux inférieurs et supérieurs du mécanisme principal. Ceci est vrai pour tous les mécanismes, mis à part le mécanisme de redressement présenté à la section précédente. Ce dernier n'agit qu'au niveau des plateaux supérieurs.

Regardons, tout au long du cycle, les mouvements des plateaux supérieurs faisant partie du pied "sauteur". Ceux desquels dépend aussi l'activation des pétales. La Figure 81 présente, en vue de dessus (plan) et en vue de profil, les plateaux supérieurs, l'actionneur AMF supérieur ainsi que les composantes faisant partie du transfert de mouvement et utile aux explications qui suivront.

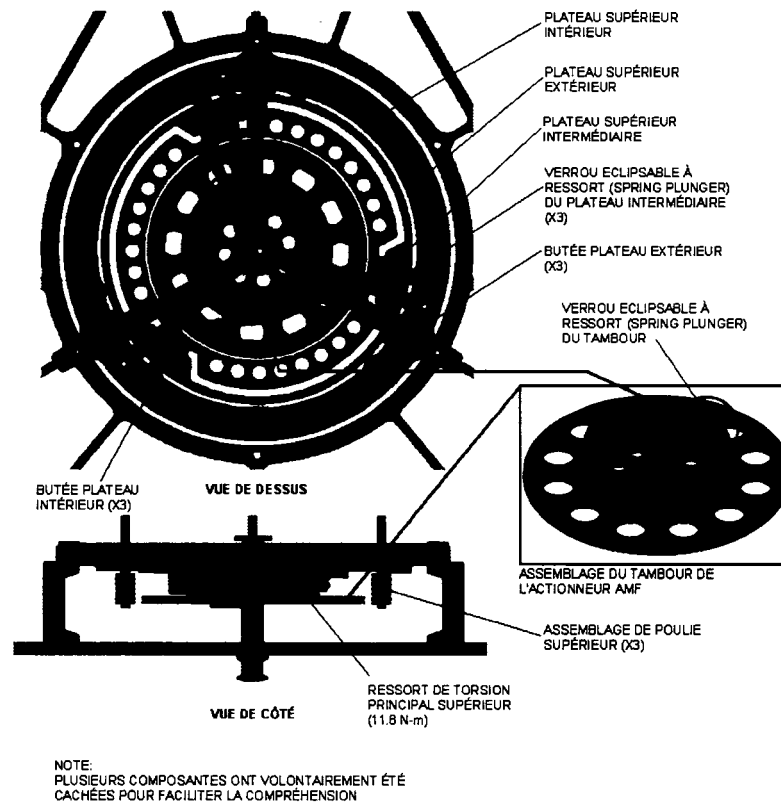


Figure 81 Vue de dessus du mécanisme servant à accumuler l'énergie pour propulser le robot

Il est à noter que le système de plateaux présenté à la Figure 81 se trouve dans la configuration "prêt pour le saut" c'est-à-dire que le ressort de torsion est comprimé, le mécanisme "sauteur" principal est chargé, donc rétracté, et que le saut est imminent.

Les paragraphes suivants illustrent les mouvements de ces plateaux au cours d'un cycle complet en partant de la configuration d'avant saut. Tout d'abord, voici une série d'images qui, par analogie linéaire, représentent l'ensemble des actions à accomplir telles que présentées au tableau III. Pour ce faire, il faut imaginer tous les déplacements produits comme étant linéaires. Ceci est aussi vrai pour le pied sauteur. La représentation par analogie linéaire et simplifiée (Figure 82 à Figure 89) favorise la compréhension du principe général, sans toutefois couvrir tous les détails constituant la conception complète, telle l'ouverture des pétales par exemple.

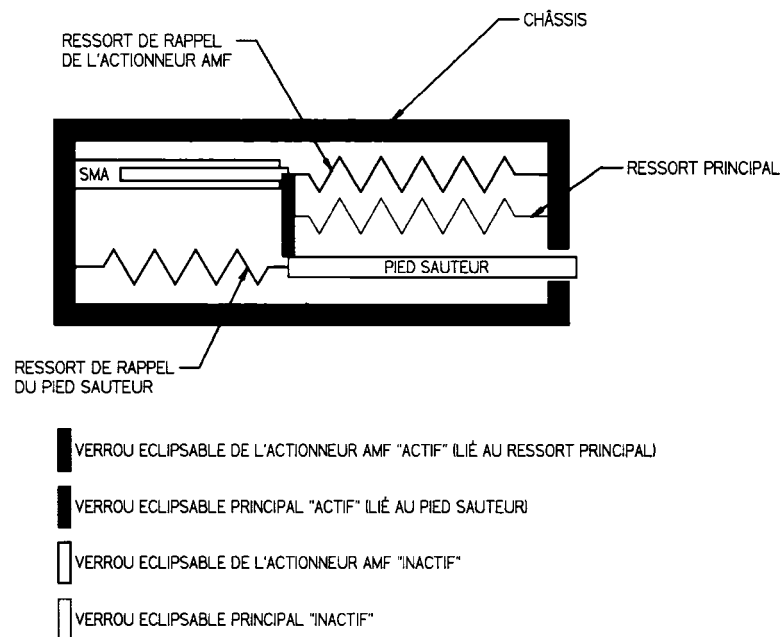


Figure 82 Analogie linéaire du robot sauteur et représentation des pièces principales

La Figure 83 présente la configuration du système à la suite d'un saut. Cette étape se situe à la frontière du cycle chaud et du début de la période de refroidissement. À ce moment, aucun lien (verrou éclipsable) n'existe entre les éléments. Ces derniers sont tous désengagés. L'actionneur AMF est à son état "comprimé", appliquant ainsi une tension sur son ressort de rappel. Le pied sauteur est rentré sous l'action du ressort de rappel malgré le fait que le ressort principal soit à sa position nominale. À ce moment, les pétales de redressement sont ouverts.

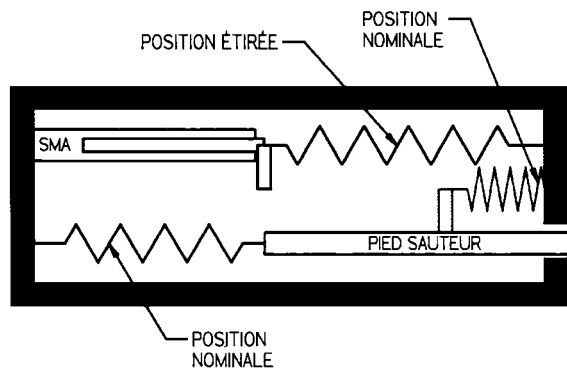


Figure 83 Analogie linéaire : Configuration à la suite d'un saut

Au fur et à mesure que la température à la surface de Mars diminue, la force de contraction de l'AMF diminue. Lorsque cette force devient plus faible que celle produite par l'extension de ressort de rappel, l'AMF revient à son état initial, c'est-à-dire vers la droite.

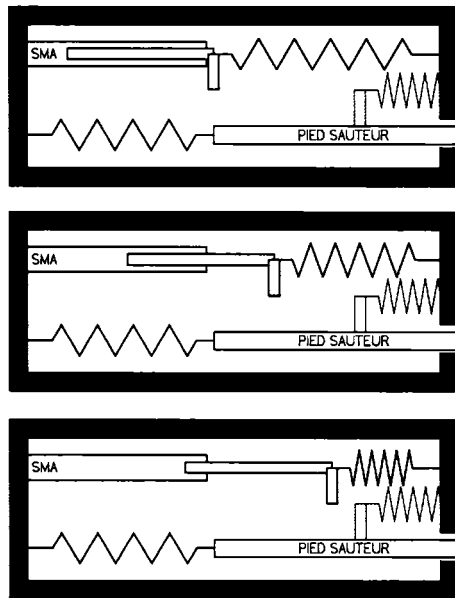


Figure 84 Analogie linéaire : Déplacement de l'AMF sous l'effet du refroidissement de température

Sous l'effet de ce déplacement, à un certain point, le verrou eclipsable de l'actionneur AMF s'enclenche sur le ressort principal. Cette étape se produit au moment où l'AMF se trouve à sa position nominale (non déformée).

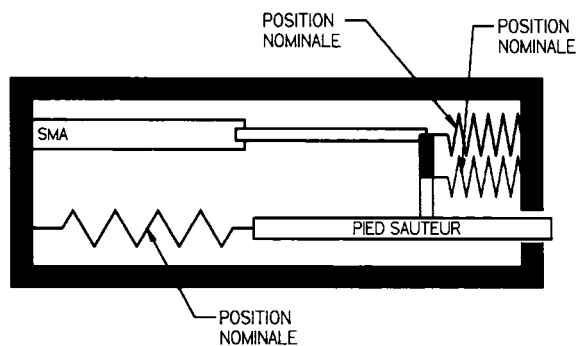


Figure 85 Analogie linéaire : Actionneur AMF à l'état nominal (non déformé)

Une fois la période de refroidissement terminée, l'actionneur AMF, sous l'effet du réchauffement de la température, passe de la phase martensitique à la phase austénitique. Ce changement de phase provoque une contraction de l'AMF, produisant ainsi une extension du ressort principal. La transmission de ce mouvement se fait via le verrou eclipsable de l'actionneur AMF et a pour effet d'accumuler l'énergie nécessaire dans le mécanisme sauteur en vue d'un prochain saut. Il est à noter que les pétales sont refermés au début de ce cycle de réchauffement.

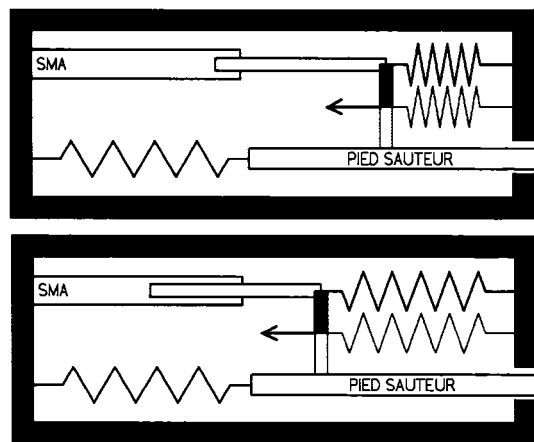


Figure 86 Analogie linéaire : Recharge du ressort principal sous l'effet d'un réchauffement de température

Une fois le ressort principal complètement rechargé, l'actionneur AMF atteint une butée de fin de course. Cet instant correspond approximativement à la limite d'élongation possible de la part de l'AMF. Dès lors, le verrou eclipsable principal s'enclenche sur le pied sauteur reliant ainsi le ressort principal au pied sauteur. La Figure 87 montre cette configuration qui a lieu approximativement au moment où la température sur Mars atteint un maximum.

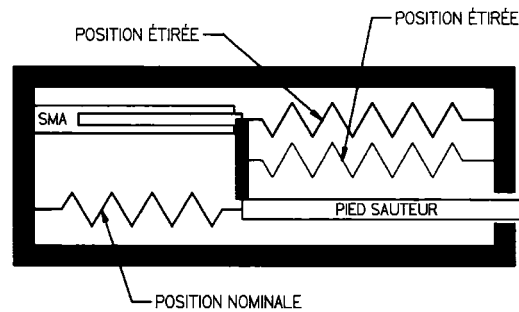


Figure 87 Analogie linéaire : Énergie entièrement accumulée dans le ressort principal

Un faible déplacement supplémentaire, généré par l'AMF, suffit pour permettre un désengagement du verrou de l'actionneur AMF et permettre au pied sauteur de se déployer, provoquant ainsi le saut du robot. La force produite par le ressort de rappel du pied sauteur est largement compensée par le retour du ressort principal à sa position nominale.

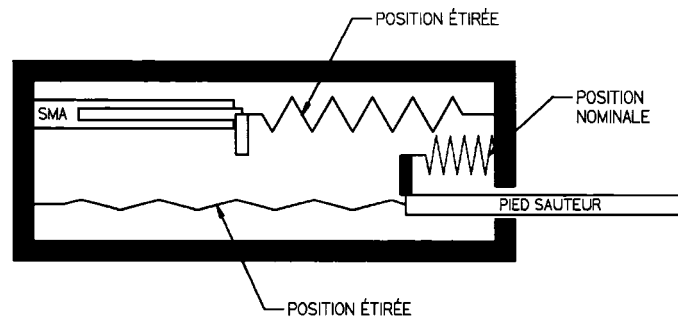


Figure 88 Analogie linéaire : Pied sauteur complètement déployé

Par contre, dès que le pied sauteur atteint la butée de blocage permettant l'amorce du saut balistique, le verrou eclipsable principal se voit désengagé de nouveau. Cette action a pour effet de briser le lien agissant entre le ressort principal et le pied sauteur, permettant au ressort de rappel du pied sauteur de rapidement faire rentrer tout le mécanisme sauteur à l'intérieur du robot. De cette façon, les risques de dommage reliés à l'impact de l'atterrissage sont donc minimisés.

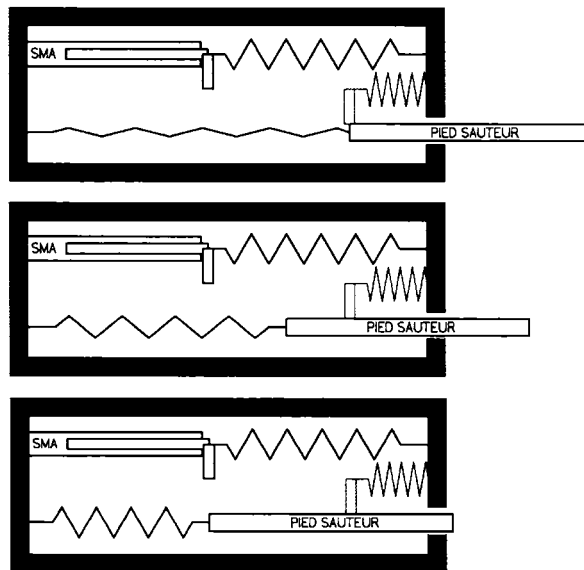


Figure 89 Analogie linéaire : Retour du pied sauteur sous l'effet du ressort de rappel

De façon plus concrète, voici de quelle façon cette analogie linéaire s'applique au "design" proposé. Tous les mouvements linéaires sont remplacés par des mouvements angulaires alors que les ressorts de tension sont remplacés par des ressorts de torsion.

Premièrement, le déploiement du mécanisme principal est amorcé lorsque le verrou eclipsable à ressort du tambour (voir encadré de la Figure 81) se rétracte pour provoquer le découplage de l'actionneur AMF du reste du système. Il faut prendre note que depuis le début de la recharge du ressort de torsion principal jusqu'à l'imminence du saut, toute l'énergie nécessaire est maintenue par cet actionneur AMF alors qu'une fois le découplage effectué, ce même actionneur AMF se retrouve libre de revenir à sa position initiale au fur et à mesure que la température diminue à la surface de Mars.

Notons, sur la Figure 81, que le ressort de torsion principal est placé entre le plateau extérieur (bleu) et le plateau intermédiaire (tan). Ce qui signifie que le plateau intermédiaire, sous l'effet du couple développé par le ressort de torsion, tournera dans le sens antihoraire et apportera avec lui, dans son mouvement angulaire, le plateau

intérieur (rouge) via d'autres verrous eclipsables à ressorts (spring plunger) et de butées situées sur les plateaux intérieurs.

La Figure 90 montre, de façon simplifiée, les divers plateaux dans leurs configurations pré-déploiement. Notons qu'un déplacement angulaire du plateau intérieur (rouge) par rapport au plateau extérieur (bleu) engendre le déploiement du mécanisme "sauteur" entraînant ainsi le robot dans son saut.

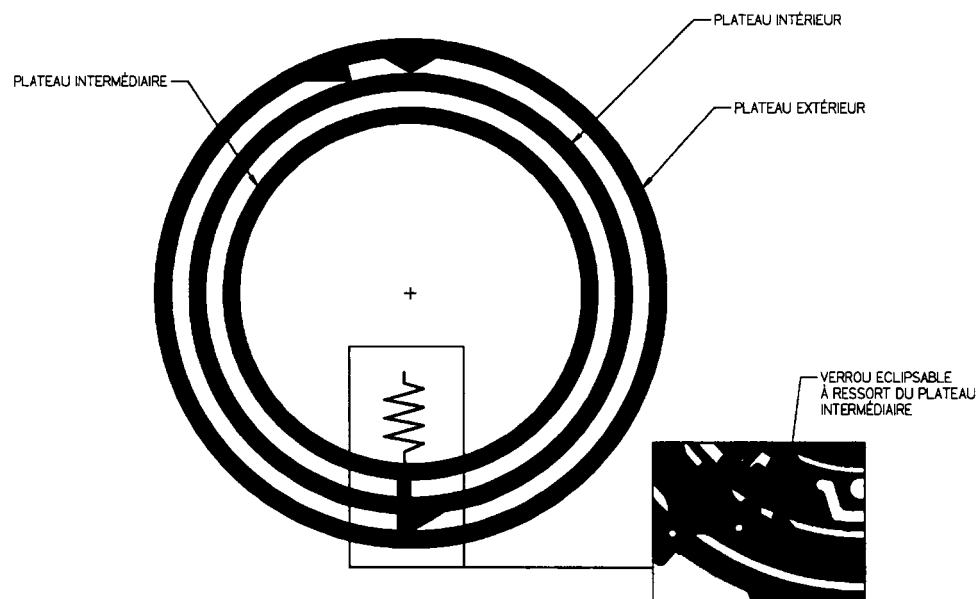


Figure 90 Représentation et disposition des plateaux circulaires "prêts" pour le déploiement du mécanisme principal (saut imminent)

Une fois l'actionneur AMF découplé du reste du système, le plateau intermédiaire (orange) entraîne le plateau intérieur (rouge) dans sa course, via un verrou eclipsable à ressort, provoquant le déploiement du mécanisme "sauteur" principal (Figure 91-A).

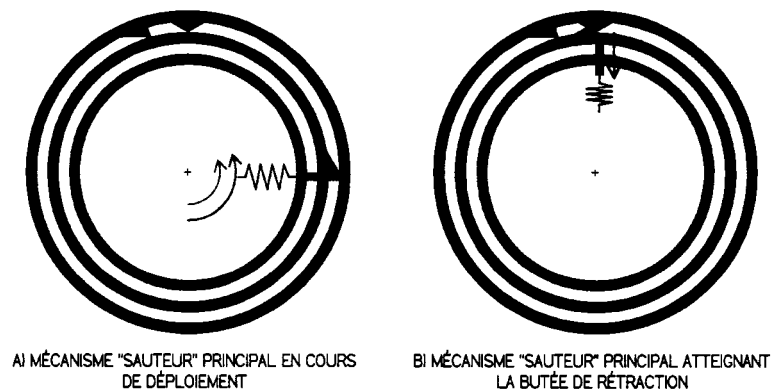


Figure 91 Mouvements relatifs des plateaux pendant le déploiement du mécanisme principal

Une fois le déploiement presque complété (Figure 91-B), les verrous eclipsables se rétractent au contact de butées situées sur le plateau extérieur (bleu). Ces butées, en forme de pics (pente ascendante suivie instantanément d'une pente descendante), permettent de désengager le plateau intérieur (rouge) du plateau intermédiaire (orange). À cet instant, le mécanisme sauteur a fini de donner l'impulsion nécessaire au saut. Un autre ressort de torsion, beaucoup plus faible que le ressort principal et positionné entre le plateau extérieur (bleu) et le plateau intérieur (rouge), rétracte alors le pied "sauteur" avant l'atterrissage. Ce nouveau ressort de torsion est appelé "ressort de rappel du pied sauteur". Il est important de noter que pendant cette phase, l'actionneur AMF et le ressort de torsion principal sont désengagés du mécanisme sauteur.

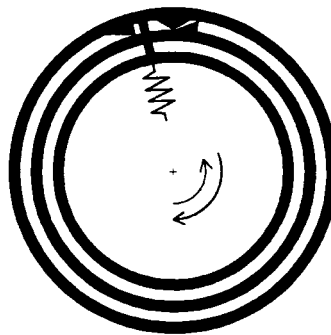


Figure 92 Mouvements relatifs des plateaux et amorce de la rétraction du mécanisme principal

Le déplacement angulaire du plateau intermédiaire (orange) s'arrête lorsque les verrous éclipsables atteignent les butées de fin de course.

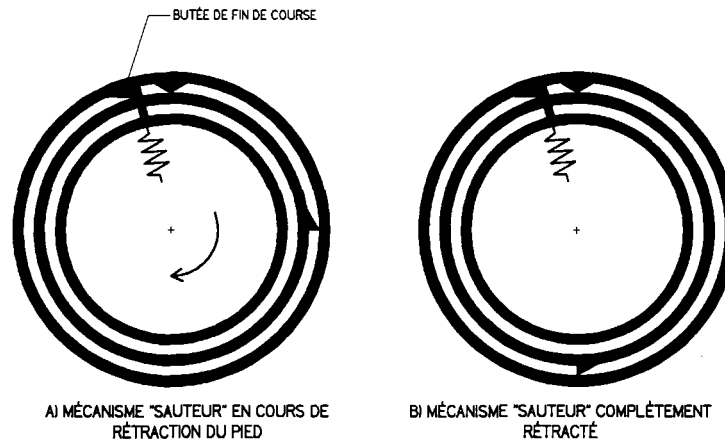


Figure 93 Configuration des plateaux pendant le saut

En plus de générer la poussée nécessaire au saut, ces mouvements de rotation des plateaux permettent l'ouverture et la fermeture des pétales de redressement, tel que mentionné à la section 7.2.2. Le plateau intermédiaire agit à titre de synchroniseur grâce à une rainure qui régit le déplacement des assemblages de poulies.

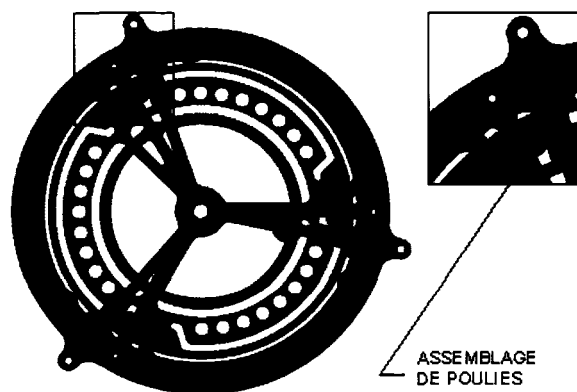


Figure 94 Configuration des plateaux immédiatement avant le déploiement du mécanisme "sauter" principal

Il est judicieux de constater que le plateau intermédiaire ne bouge que pendant le déploiement du mécanisme sauteur ainsi que lors de la recharge de ce dernier. La Figure 95 indique les sens de rotation du plateau intermédiaire relatif à chacune de ces actions ainsi que l'endroit où se situe les assemblages de poulies à certains instants précis.

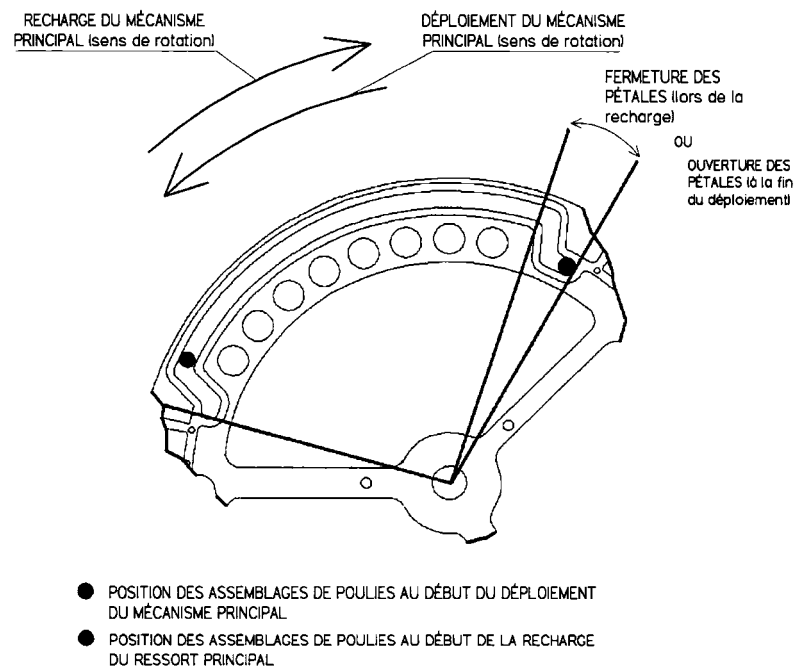


Figure 95 Sens de rotation du plateau intermédiaire et position des assemblages de poulies

Voici une description plus détaillée des verrous eclipsables à ressorts faisant parti du plateau intermédiaire. Ces derniers sont installés dans des cavités prévues à cette fin et directement machinées à même le plateau.

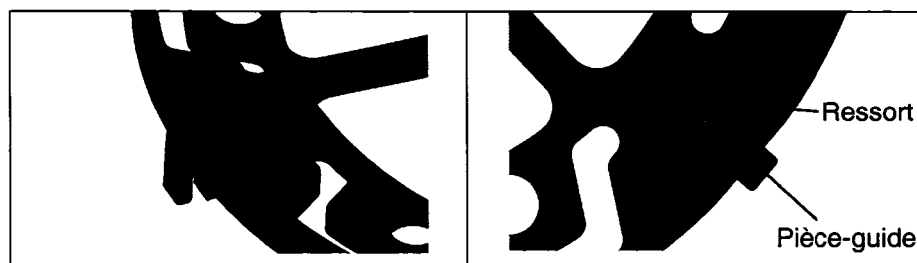


Figure 96 Verrou eclipsable (vue détaillée)

Un ressort de compression, situé à l'arrière d'une "pièce-guide", permet à cette dernière de pouvoir se rétracter en glissant à l'intérieur de la cavité sous l'effet d'une force axiale. Le ressort permet à la "pièce-guide" d'être en position "normalement déployée" au repos. Un couvercle et quatre vis permettent au ressort et à la "pièce-guide" de demeurer en place. Les vis, le ressort de compression et la "pièce-guide" sont toutes des composantes en acier inoxydable de la série 300 alors que le plateau intermédiaire est en aluminium 6061-T6.

Tel que présenté à la Figure 97, un autre verrou eclipsable situé sur le tambour de l'actionneur AMF sert à transmettre au plateau intermédiaire la force générée par l'actionneur. Ce verrou relie l'actionneur AMF au ressort de torsion principal pendant la phase de recharge du ressort de torsion principal. Lorsque l'actionneur se réchauffe et tourne pour recharger le ressort, ce verrou permet de "physiquement" transmettre le mouvement de rotation.

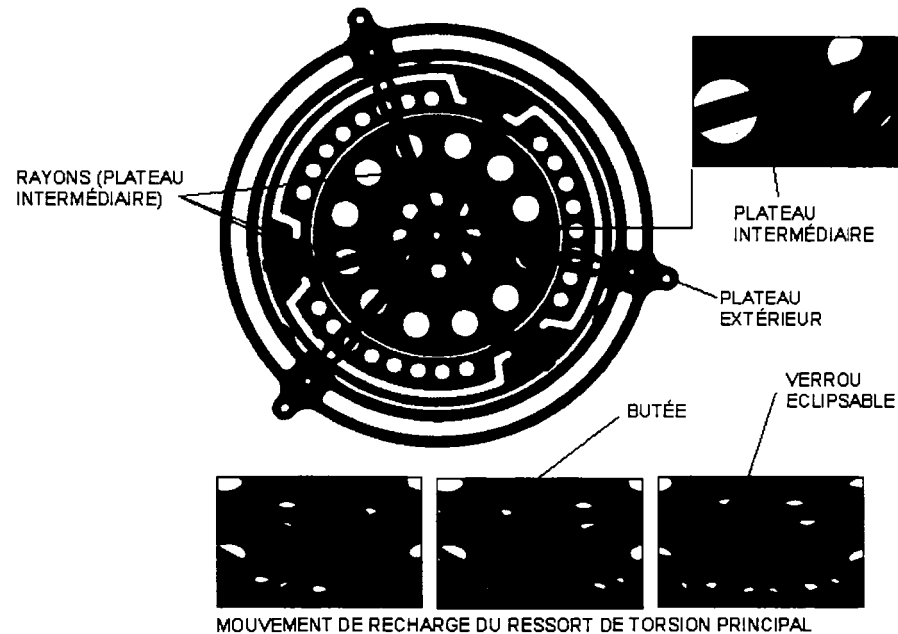


Figure 97 Fonctionnement du système de recharge du ressort principal via le tambour de l'actionneur AMF

Une fois le ressort complètement rechargé (mécanisme comprimé), ce verrou atteint une butée qui le fait se rétracter afin de le découpler du reste du mécanisme. Cette action libère le ressort de la force de "maintien" que procure l'actionneur AMF libérant ainsi le plateau intermédiaire et permettant le déploiement du mécanisme "sauteur" principal. Une fois le déploiement du mécanisme complété, les fils droits d'alliage à mémoire de forme se refroidissent au fur et à mesure que la température à la surface de Mars diminue et l'actionneur, sous l'effet d'un ressort de rappel (section 5.2), revient lentement à sa position initiale. À ce moment, le verrou rétractable présenté à la Figure 97 et la Figure 98, s'agrippe de nouveau au rayon situé sur le plateau intermédiaire. De cette façon, lorsque les fils AMF recommenceront à se réchauffer pour activer l'actionneur AMF, l'énergie pourra de nouveau être emmagasinée dans les ressorts de torsion.

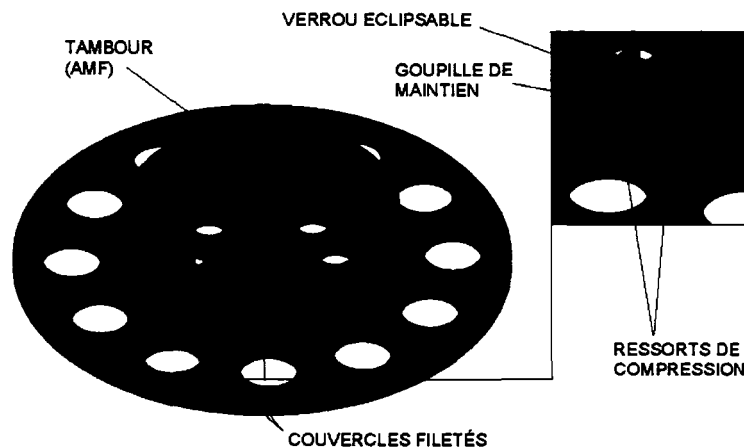


Figure 98 Assemblage du tambour de l'actionneur AMF et son verrou servant à la transmission du mouvement

Le verrou éclipseable (pièce bleue) est "normalement déployé" sous l'action de deux ressorts de compression. Une goupille de maintien assure un mouvement linéaire du verrou et deux couvercles filetés retiennent les ressorts en place dans des ouvertures usinées à même le tambour de l'actionneur AMF. L'extrémité du verrou contient une rainure qui, en s'agrippant à un des rayons du disque intermédiaire tel que montré à la Figure 97, agit comme lien de transmission du mouvement. Les deux pentes, situées de part et d'autre de la rainure, servent à désengager les deux disques dans le but de

permettre le saut. Il est à noter que toutes les pièces faisant partie de l'assemblage de ce verrou éclipseable, y compris les ressorts, sont en acier inoxydable de la série 300. Tous ces mouvements relatifs de rotation des plateaux doivent être réalisés de façon à minimiser les pertes dues au frottement. C'est la raison pour laquelle cette force de friction entre les plateaux circulaires a été considérée lors de la conception mécanique. Ces plateaux sont superposés et retenus par un seul et même arbre passant par le centre de chacun d'eux. Des butées à billes (thrust ball bearings) ont été insérées entre chacun des plateaux afin de prévenir un contact direct en deux pièces en mouvement.

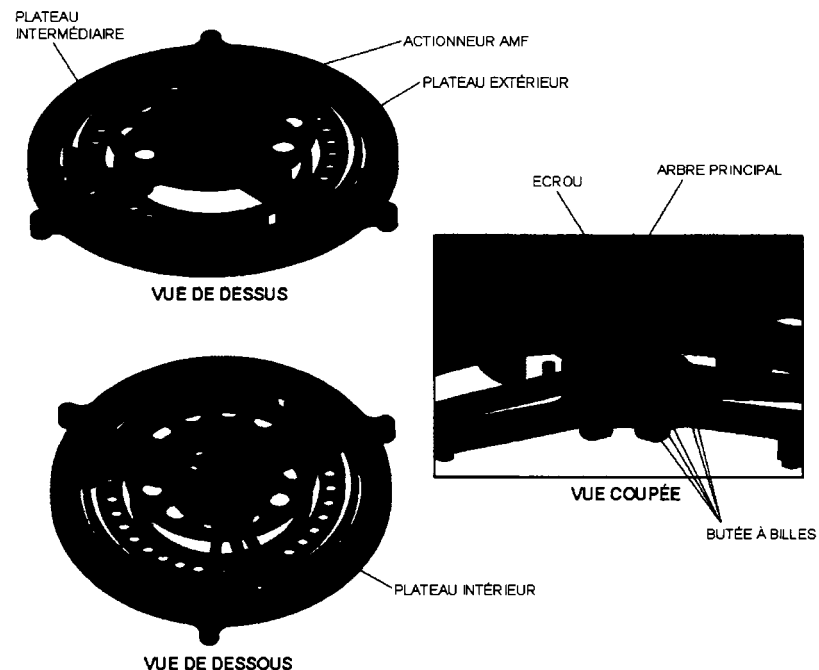


Figure 99 Assemblage, par superposition, des plateaux rotatifs

L'utilisation des butées à billes entre les plateaux offre l'opportunité d'appliquer une pré-tension dans l'arbre principal. En ajoutant une partie filetée à l'extrémité de cet arbre et en utilisant un écrou de serrage, un assemblage de type "sandwich" incluant toutes les composantes superposées est formé. L'écrou de serrage sert à maintenir les pièces les unes contre les autres. En plus d'une nette réduction de la force de frottement entre les pièces en mouvement, ce "design" simplifie l'assemblage et augmente la

stabilité en offrant une reprise du jeu qui pourrait s'être produit par un mauvais contrôle des tolérances lors de la fabrication. L'arbre principal, agissant comme point de pivot des plateaux et comme vis de serrage de l'assemblage, ainsi que l'écrou sont tous deux fabriqués en acier inoxydable de la série 300 alors que les butées à billes, disponibles sur le marché, sont faites d'acier inoxydable et de polymère.

CHAPITRE 9

CONCEPTION DU SYSTÈME DE REPOSITIONNEMENT

9.2 Général

Le système de repositionnement sert à positionner le robot suivant un angle d'environ 53° pour ainsi lui permettre de suivre la trajectoire parabolique préalablement déterminée. Bien que la conception "finale" de ce mécanisme ne soit pas considérée comme étant nécessaire dans cette première itération de "design", il est tout de même primordial d'en regarder la nature et d'en présenter les idées générales. Le dispositif de repositionnement devrait, de façon idéale, transmettre toute l'énergie contenue dans le mécanisme "sauteur" principal au sol martien. Pour ce faire, il sera nécessaire de considérer un mécanisme très rigide. Un dispositif "passif" rétractable aurait la capacité de se loger à l'intérieur de la structure entre chaque saut et un système "actif" permettrait par la même occasion, d'orienter²⁶ le robot dans une direction précise pour effectuer le saut.

Une étude plus approfondie serait nécessaire afin d'étudier l'interaction des mouvements du système de repositionnement par rapport aux autres mécanismes faisant déjà parti du robot. Cependant, cette facette n'est pas présentée dans ce mémoire.

9.2 Système de positionnement "passif" rétractable

Le mécanisme de repositionnement "potentiel" consiste en un socle amovible ou "rétractable". Ce système, préalablement replié sous le robot, aurait la capacité de se déployer sur 53° depuis sa position refermée pour permettre l'exécution du saut balistique. Le déploiement possible du pied de repositionnement minimise le nombre de pièces situées à l'extérieur de la structure primaire du robot lors de l'atterrissage

²⁶ Le terme "orienter" signifie la direction suivant laquelle nous voulons que le robot se déplace (Nord-Sud-Est-Ouest).

pour ainsi réduire les risques de dommages. Un tel mécanisme permettrait, si le besoin se faisait sentir, de contrôler l'angle avec lequel le robot amorcerait sa trajectoire parabolique.

Bien que la réalisation d'un tel système puisse se faire de plusieurs façons, le principe demeurera toujours le même. Lorsque le saut devient "imminent", le pied de repositionnement se déploie au bon angle faisant ainsi incliner tout le robot dans sa position de décollage. Comme cet angle de 53° n'est nécessaire que pour le saut, un principe similaire à celui utilisé pour l'activation des pétales (section 7.2.2) pourrait être pensé. Il serait possible d'utiliser le déplacement d'un alliage à mémoire de forme afin de faire pivoter le pied, à l'angle désiré, autour de charnières prévues à cette fin. De plus, cet actionneur pourrait être complètement indépendant du reste du robot ou partiellement couplé aux mouvements déjà existants. Le principal défi de conception réside dans le développement d'un système qui serait à la fois léger et rigide.

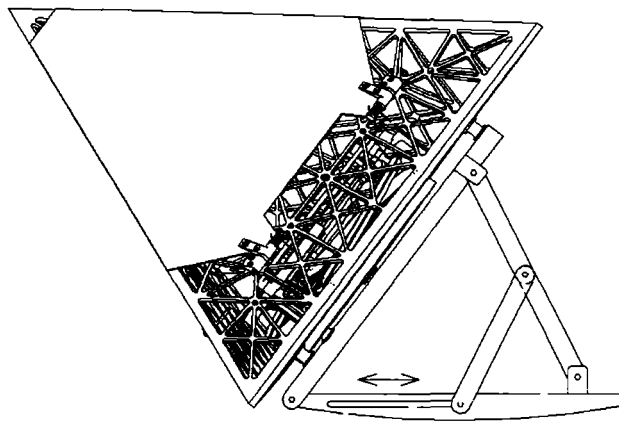


Figure 100 Schéma d'un robot sauteur muni d'un pied de redressement rétractable et passif

9.3 Système de positionnement "actif" rétractable

Regardons brièvement comment il serait possible d'ajouter une fonction de rotation supplémentaire dans le but de rendre ce système "actif". En effet, l'action d'installer ce socle rétractable sur une table pivotante aurait comme conséquence de permettre une rotation relative de tout le robot par rapport au sol. Ce mécanisme muni de roulements

aurait l'avantage de permettre au robot de sauter dans une direction donnée au lieu de le contraindre à se diriger suivant une trajectoire aléatoire.

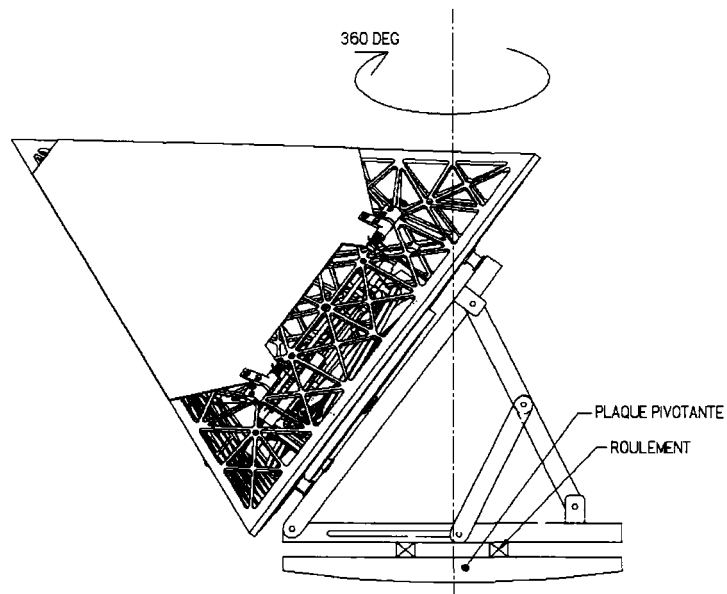


Figure 101 Schéma d'un robot sauteur muni d'un dispositif d'orientation "actif"

Comme le déplacement angulaire maximum demeure 360° , il existe plusieurs façons d'actionner la table pivotante, notamment en utilisant un AMF dans lequel passerait un courant électrique ou simplement, un moteur électrique classique. Dans le cas d'un actionneur AMF rotatif, l'aspect de "contrôle" pourrait devenir imprécis dû à la variation de la température ambiante affectant les élongations de ce dernier, voire même impossible compte tenu du faible gradient de température délimitant la température de changement de phase associée. Par contre, l'utilisation d'un moteur électrique muni d'un dispositif pour fermer la boucle, tel un encodeur optique par exemple, permettrait au robot de se diriger suivant une direction très précise.

CHAPITRE 10

DISCUSSION, PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

Le concept de robot "sauteur" présenté dans cet ouvrage traite des aspects mécaniques servant aux déplacements en milieu à faible gravité. La faible taille de ce dernier lui confère le statut de microrobot et l'utilisation du saut comme moyen de locomotion offre un avantage intéressant pour assurer la mobilité en milieu rocailleux comme la surface de Mars. La faible force gravitationnelle agissant sur la planète rouge ainsi que la densité atmosphérique, de loin inférieure à celle de la terre, sont deux facteurs favorisant le saut comme moyen de locomotion. Le concept présenté utilise les variations de température journalières comme source de puissance. Un actionneur à alliage à mémoire de forme, couplé à un mécanisme à ressort, permet au robot de bondir à la surface de Mars à raison d'un saut par jour. La conception présentée comprend un mécanisme de redressement à pétales servant à replacer le robot sur son socle entre chaque saut alors que des cellules photovoltaïques montées sur ces pétales ont la faculté de recharger des accumulateurs, pour ainsi fournir la puissance aux instruments scientifiques à bord.

Bien que la conception présentée soit préliminaire, il a été utile d'approfondir le développement de certains sous-systèmes faisant partie de l'assemblage global. Un mécanisme innovateur à ciseaux cylindrique a été développé. Ce mécanisme déployable sert à transférer convenablement l'énergie emmagasinée dans un ressort pour faire sauter le robot. Un prototype d'actionneur à alliage à mémoire de forme a été conçu, fabriqué et mis à l'essai. Cet unique actionneur permet au robot d'effectuer plusieurs tâches de façon séquentielle tel que le redressement suite à l'atterrissage ou la recharge des ressorts principaux par exemple. Le concept tire avantage du gradient de température élevé entre le jour et la nuit à la surface de Mars.

La structure primaire du robot sauteur conçu a une forme de tétraèdre ayant des côtés équilatéraux de 350 mm alors que la masse totale de la structure mécanique incluant tous les mécanismes est de 1.3 kg. L'actionneur AMF servant à produire l'énergie et

les déplacements nécessaires au bon fonctionnement de tous les mécanismes est composé d'un fil en alliage de nickel-titane (Ni-Ti) ayant une température de changement de phase de -40°C . Un angle d'attaque de 53° devrait permettre au robot d'atteindre une distance de trois (3) mètres à chaque saut.

Un prototype complet du robot sauteur, incluant tous les sous-systèmes, est présentement en cours de fabrication et d'intégration. Ce prototype permettra de valider l'interaction entre chaque mécanisme ainsi que la performance du robot. Bien que l'usinage de la plupart des composantes soit déjà terminé, la complexité de l'intégration de ces dernières ainsi que la fabrication de celles restantes fait en sorte que les essais expérimentaux sont prévus pour septembre 2006.

Toutefois, certaines prédictions sur les résultats peuvent déjà être faites. En effet, bien que le mécanisme à ciseaux cylindrique fonctionne comme prévu et que l'actionneur développe le déplacement et le couple "théorique" nécessaire, l'intégration de tous ces éléments aux autres sous-systèmes génère plusieurs incertitudes. Comme il s'agit d'un assemblage complexe, que la plupart des pièces sont en mouvement les unes par rapport aux autres et qu'elles sont toutes reliées entre elles, une attention très particulière devra être portée aux interférences lors des essais. De plus, il se peut que l'intégration de toutes les composantes à l'intérieur de la structure primaire (tétraèdre) soit plus difficile que ce qui a été envisagé. Plusieurs ressorts doivent y être insérés et bien que ces étapes aient été planifiées, beaucoup de minutie sera nécessaire et certains problèmes potentiels d'intégration peuvent avoir été omis lors de la conception.

En ce qui concerne le rendement, puisque la masse totale de 1.3 kg du système "conçu" excède légèrement le prérequis d'un (1) kg, la portée du saut sera affectée. Même constat en ce qui concerne la déviation du volume par rapport à l'hypothèse de base. Cette faible hausse aura pour effet d'augmenter la résistivité de l'air pendant le saut pour ainsi réduire légèrement la distance parcourue. Comme la densité atmosphérique à la surface de la Terre est supérieure à celle de Mars, cet effet sera amplifié lors des essais expérimentaux.

Vers la fin de la conception et après que l'ensemble des pièces furent envoyées en fabrication, il a été découvert que l'activation des pétales de redressement, bien qu'elle soit convenablement réalisée pour remettre le robot sur son socle, n'offre pas la solution optimale au niveau thermique de même que pour la recharge des accumulateurs. La conception présentée force les pétales à s'ouvrir dès l'atterrissage qui a lieu au moment où la température à la surface de Mars recommence à chuter après avoir atteint un maximum (en après-midi). Cependant, il a été déterminé que l'électronique qui fera partie du robot sauteur ne pourra pas survivre aux froides températures de la nuit martienne sans une protection thermique fournie par ces mêmes pétales. C'est pour cette raison que dans une deuxième itération de conception, les pétales devraient demeurer fermés toute la nuit et ne s'ouvrir que le matin, permettant ainsi une recharge des cellules photovoltaïques y étant montées. Une partie de la période d'ensoleillement perdue en après-midi pourrait être reprise en retardant la fermeture des pétales avant le saut.

Étant donné qu'il s'agit d'une conception préliminaire basée sur un développement empirique, plusieurs facteurs n'ont pas été pris en considération. En effet, les pièces structurelles n'ont pas été complètement analysées par éléments finis et la friction n'a pas été considérée de façon précise à tous les endroits. Plusieurs hypothèses ont été faites à ce sujet. Il sera sûrement judicieux d'apporter quelques modifications à la conception en cours d'assemblage et à la suite des essais finaux et ce, afin de palier les lacunes reliées à une telle approche.

Il serait important, dans la prochaine itération, de simuler l'atterrissage afin de pouvoir évaluer l'impact au sol et la capacité structurelle de la structure primaire vis-à-vis cette charge. Le mécanisme de repositionnement servant à donner l'inclinaison nécessaire au saut balistique, bien qu'il ne fasse pas partie du mandat de base de ce projet, devra être étudié de plus près dû à son interaction importante avec les autres sous-systèmes. Une autre recommandation concerne l'enveloppe géométrique et la masse du prototype de robot. Ces deux paramètres, reliés entre eux, devraient être optimisés dans une prochaine itération afin de minimiser la taille des ressorts nécessaires et/ou de favoriser la portée que procurera la trajectoire balistique. Par contre, il faudra, avant

même de procéder à une optimisation de la structure, vérifier et quantifier l'influence du "couple" généré par le déploiement du mécanisme "sauteur" sur la qualité et le rendement du saut. Il faudra faire les corrections nécessaires s'il y a lieu et évaluer les effets thermo-élastiques sur la distorsion de la structure mécanique. En ce qui concerne l'actionneur développé dans cette recherche, il serait nécessaire de procéder à une caractérisation plus approfondie de l'alliage à mémoire de forme lors de travaux futurs. Cet exercice aurait pour but de mieux connaître le travail mécanique réel pouvant être produit par le fil choisi et par conséquent, celui produit par l'actionneur lui-même.

En plus de procéder à l'intégration du prototype proposé, une deuxième maquette est présentement en cours de conception et de fabrication. Cette maquette servira essentiellement à démontrer les fonctionnalités électroniques et thermiques ainsi qu'à approfondir les aspects mis de côté précédemment. À la fin de l'exercice, ces deux prototypes seront imbriqués afin de contenir tous les sous-systèmes nécessaires pour la mission donnée, incluant les charges utiles.

La présente recherche permet de confirmer le potentiel d'un tel moyen de locomotion aux fins d'explorations planétaires et compte tenu de la popularité grandissante des petites missions, elle permettra de converger vers un résultat innovateur et utile dans un futur rapproché.

ANNEXE 1

Étude sur les roches recouvrant la planète Mars

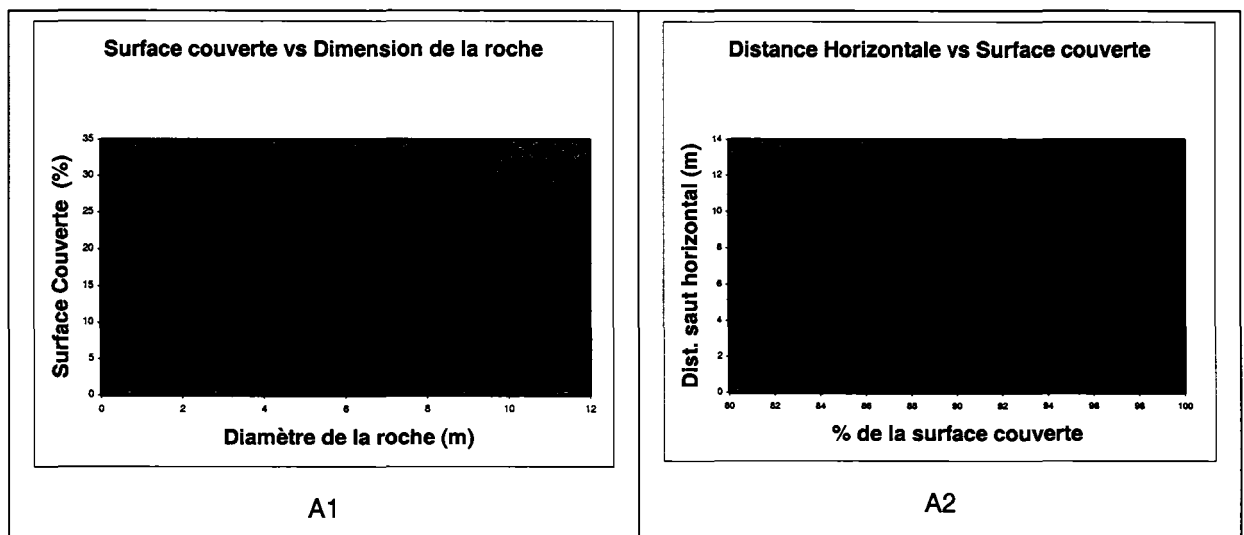
Afin d'avoir une meilleure idée de la rugosité du sol de la planète Mars et de la grosseur des roches la recouvrant, les données topographiques de cette dernière ont été utilisées. Cette information a été traitée par la NASA à partir de données recueillies par l'instrument MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), à bord du "Mars Global Surveyor". Ces données topographiques ont grandement aidé à déterminer la dimension des obstacles que le robot devait franchir à chaque saut. Comme la mission est à ce jour générique, dans le sens où nous nous laissons la liberté éventuelle d'atterrir à n'importe quel endroit sur la planète, il a été évalué qu'un saut parabolique atteignant une hauteur d'un mètre pour une longueur horizontale d'environ trois (3) mètres permettait de parcourir, en moyenne, 95 % de la surface de la planète sans être bloqué par une roche. Ces chiffres sont évidemment théoriques et certains facteurs ne sont pas considérés, tel que l'amorce d'un saut à proximité d'une roche, ou un saut sur une surface angulaire par exemple. En effet, ces valeurs sont basées sur le cas idéal où la roche en question, lors d'un saut, se situe à mi-chemin horizontalement entre le point de départ et l'arrivée.



Figure A1 Trajectoire balistique imagée et emplacement idéal de la roche

Tel que discuté plus haut, voici deux courbes qui, basées sur les données de MOLA, donnent de l'information pertinente sur la couverture possible du robot sauteur à la surface de la planète Mars. Dans un premier temps, le graphique A1 donne une approximation de la disposition des roches sur Mars. Il s'agit en fait d'une densité topographique basée sur la grosseur des roches. Par exemple, il est estimé que 1 % de la surface martienne est recouverte de roches ayant un diamètre de 10 mètres alors que 4 % de cette même surface est recouverte par des roches d'un mètre. Les roches de petits formats recouvrent la majeure partie de la surface de Mars. Accompagné du

graphique A2, nous pouvons déterminer le pourcentage de la surface martienne pouvant être parcourue en fonction de la portée horizontale de chaque saut. Plus la distance horizontale "atteignable" est élevée (portée), plus les roches franchissables risquent d'être de fortes tailles. Ce qui revient à dire que plus la portée est grande, plus le robot aura l'opportunité de couvrir une grande superficie martienne sans se buter à un obstacle.



Graphique A1 Répartition des roches de différentes grosseurs à la surface de Mars

Graphique A2 Surface martienne pouvant être couverte en fonction de la portée de chaque saut

ANNEXE 2

L'étude du saut (Analogie linéaire)

Une première analyse grossière a été faite en supposant l'utilisation d'un ressort linéaire comme accumulateur d'énergie. Pour ce faire, un système masse-ressort "classique" sans amortissement a été supposé. La masse totale du robot est de un (1) kg (prérequis de conception). La course du ressort linéaire est limitée à 0.1 mètre afin de satisfaire les contraintes géométriques (cube de 350mm de côté) avec une marge raisonnable.

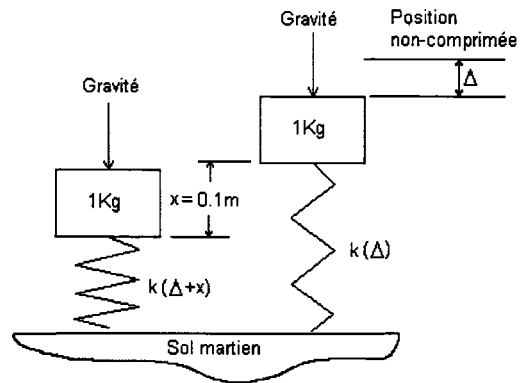


Figure A2 Schéma des forces externes et déplacements régissant le déploiement du robot (système à ressort linéaire simplifié)

Le système comprend une force due à l'accélération gravitationnelle de Mars (3.7 m/s^2) couplée à la masse du robot ainsi qu'une force de rappel, proportionnelle à l'élongation du ressort et agissant dans la direction opposée. Il s'agit d'un mouvement oscillatoire vertical dont notre intérêt portera uniquement sur un quart de cycle, c'est-à-dire, une élongation de 0.1 mètre.

Hypothèses:

- Parfaite élasticité du ressort
- Résistance de l'air nulle
- Système non-amorti
- Masse du ressort nulle

Lorsque le système masse-ressort présenté à la figure A2 est à l'équilibre, suivant la deuxième loi de Newton, l'équation suivante est obtenue :

$$k\Delta = mg \quad (\text{A-1})$$

Lorsque nous forçons un déplacement de la masse vers le sol d'une valeur de "x" afin de comprimer le ressort dans le but d'effectuer un saut, la force de rappel générée par le ressort, et appliquée sur la masse est décrite par l'équation suivante :

$$F_R = k(\Delta + x) \rightarrow \text{où "k" correspond à la raideur du ressort en } \frac{N}{m} \quad (\text{A-2})$$

Pendant le déploiement du ressort, nous sommes en présence d'une force générée par ce dernier travaillant à sens inverse de la force générée par la masse du robot sous l'effet de la gravité. En prenant le sol martien comme origine, l'objet est soumis à son propre poids vers le bas et à une force exercée vers le haut par le ressort. Nous obtenons alors l'équation différentielle suivante :

$$ma = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = m\ddot{x} = \sum F = mg - k(\Delta + x) \quad (\text{A-3})$$

Comme:

$$mg = k\Delta \quad (\text{A-4})$$

Alors:

$$ma = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = m\ddot{x} = -kx \quad (\text{A-5})$$

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (\text{A-6})$$

où:

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Alors:

$$\ddot{x} + w^2 x = 0 \quad (\text{A-7})$$

En utilisant les transformées de Laplace pour résoudre l'équation différentielle de 2^e ordre régissant le mouvement de la masse :

$$m(s^2 X(s) - sx_0 - v_0) + w^2 X(s) = 0 \quad (\text{A-8})$$

$$X(s)(s^2 + w^2) - sx_0 - v_0 = 0 \quad (\text{A-9})$$

$$X(s) = \frac{sx_0}{(s^2 + w^2)} + \frac{v_0}{(s^2 + w^2)} \quad (\text{A-10})$$

Pour enfin obtenir l'équation du déplacement de la masse en fonction du temps :

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(wt) + \left(\frac{v_0}{w}\right) \cdot \sin(wt) \quad (\text{A-11})$$

Comme la vitesse initiale de la masse au temps zéro (v_0) est nulle, l'équation du mouvement est obtenue :

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(wt) \quad (\text{A-12})$$

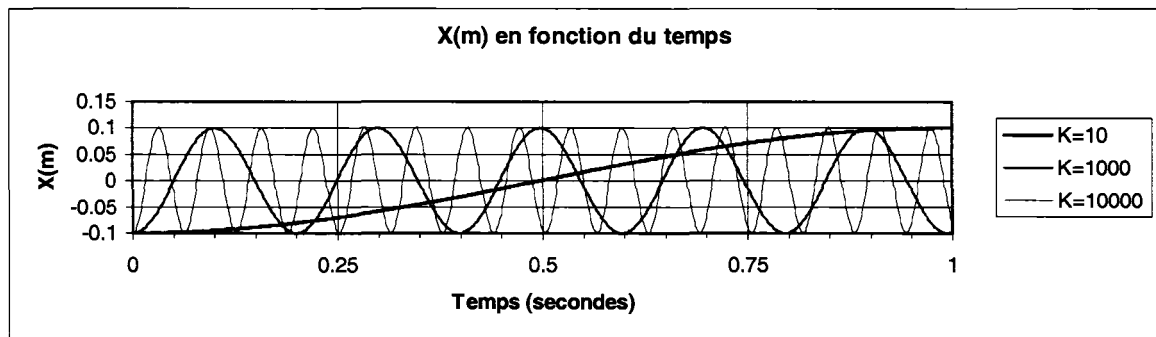
où:

$$x_0 = -0.1 \text{ mètres}$$

et

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

En supposant que le robot devrait quitter le sol lorsque le centre de gravité (CdeG) de sa masse atteint la fin de la course du ressort. C'est-à-dire lorsque ce dernier sera complètement déployé mais non étiré, voici un graphique montrant le déplacement de ce même centre de masse, depuis la position comprimée jusqu'à l'amorce du saut. Ce déplacement, en fonction du temps, dépend de la constante de raideur du ressort. Voici les courbes présentant les déplacements de la masse de 1 kg en fonction du temps, pour des ressorts ayant des coefficients de rigidité respectifs de 10 N/m, 1000 N/m et 10000 N/m.



Graphique A3 Déplacement du CdeG du robot en fonction du temps pour différentes valeurs de "K"

On remarque que le temps nécessaire pour que le ressort passe de la position "comprimée" à la position où, théoriquement, le robot devrait sauter, est très court. Cette valeur varie entre 0.016 secondes pour un ressort ayant une constante de rigidité de 10000 N/m jusqu'à 0.5 secondes dans le cas d'un ressort ayant une constante de

rigidité de 10 N/m. Il s'agira donc d'une impulsion relativement ponctuelle. Regardons maintenant ce que donne la dérivée de l'équation du déplacement :

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A-13})$$

Alors:

$$v(t) = -\omega x_0 \sin(\omega t) \quad (\text{A-14})$$

et

$$a(t) = -\omega^2 x_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A-15})$$

Puisque la vitesse minimale à atteindre pour produire un saut ayant une trajectoire balistique d'une portée de trois (3) mètres et une hauteur d'un (1) mètre a été obtenue, il est nécessaire d'évaluer la constante de raideur nécessaire. En effet, dans le but d'obtenir un système optimal, il est utile de regarder pour quelle valeur de k (N/m), la vitesse minimale de 3.4 m/s sera obtenue. Il a été déterminé que cette vitesse devra être atteinte lorsque le ressort passera l'axe horizontal. C'est-à-dire lorsque l'élongation de ce dernier égalera zéro et ce, en posant l'hypothèse que le robot quittera le sol à cet instant.

La vitesse sera maximale lorsque l'accélération et le déplacement du ressort seront tous les deux nuls.

$$x(t) = 0 = -0.1 \cos(\omega t) \quad (\text{A-16})$$

$$v(t) = 3.4 = -0.1 \omega \sin(\omega t) \quad (\text{A-17})$$

$$a(t) = 0 = -0.1 \omega^2 \cos(\omega t) \quad (\text{A-18})$$

L'énergie totale réalisée pendant la décompression du ressort est, quant à elle, décrite par l'équation suivante :

$$E(t) = K(t) + U(t) \quad (\text{A-19})$$

où:

$$KE(t) = \frac{1}{2} m \cdot (v(t))^2 \quad (\text{A-20})$$

et

$$UE(t) = \frac{1}{2} k \cdot (x(t))^2 \quad (\text{A-21})$$

Comme la vitesse à atteindre correspond à 3.4m/s, alors :

$$KE = \frac{1}{2} m \cdot (3.4)^2 \rightarrow \text{Énergie cinétique}$$

$$KE = 5.78 \text{ Joules}$$

Alors:

$$E(t) = \frac{1}{2} m (-\omega x_0 \sin(\omega t))^2 + \frac{1}{2} k (x_0 \cos(\omega t))^2 \quad (\text{A-22})$$

Le robot devrait idéalement sauter lorsque l'énergie cinétique atteint son maximum:

$$KE = 5.78 \text{ Joules}$$

Donc:

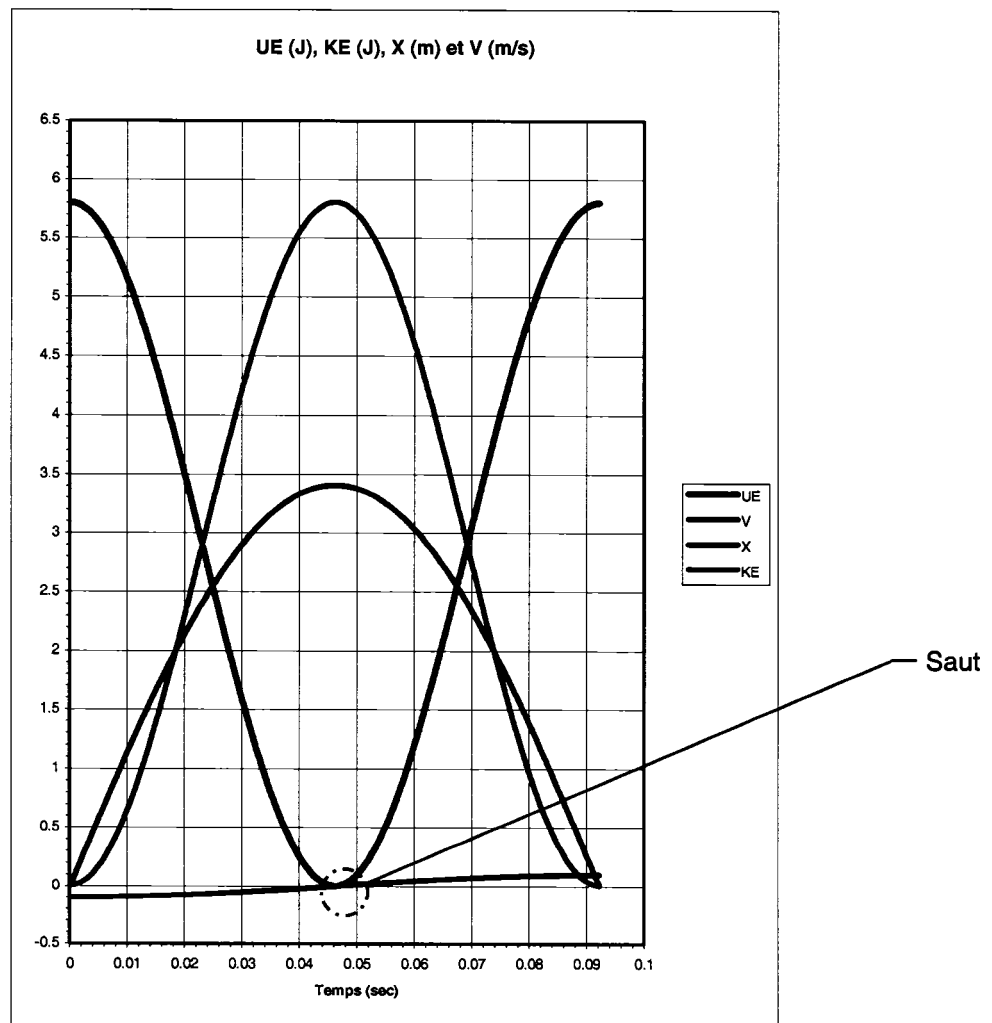
$$5.78 \text{ J} = \frac{1}{2} k \cdot (x(t))^2$$

Alors:

$$5.78 = \frac{1}{2} k (x_0 \cos(\omega t))^2 \quad (\text{A-23})$$

De façon idéale, le déplacement devrait lui aussi être égal à zéro. En effet, un déplacement ($x(t)=0$) assurerait que le saut s'effectue au moment où l'énergie potentielle est maximisée. Pour ce faire, plusieurs itérations ont été faites en faisant varier la constante de raideur du ressort (k) jusqu'à l'obtention d'une valeur de l'énergie potentielle maximum de 5.78 Joules.

Voici, sur un même graphique, les courbes qui correspondent au déplacement, à la vitesse et aux deux énergies exercées sur la masse en fonction du temps :

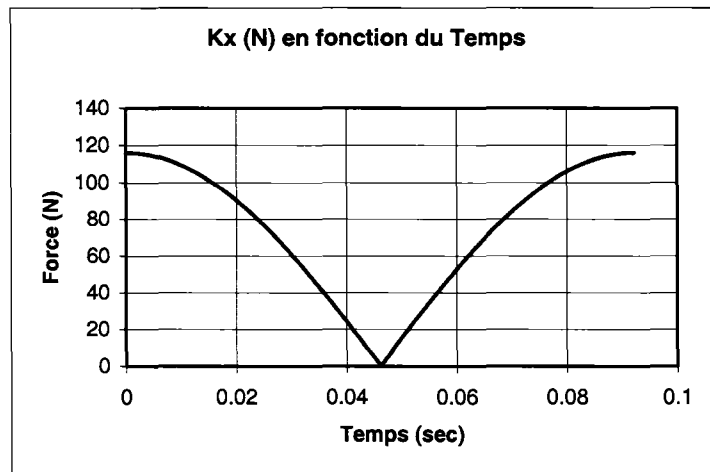


Graphique A4 Énergies, vitesse et déplacement du CdeG du robot en fonction du temps lors du déploiement

Afin d'obtenir la vitesse désirée pour effectuer correctement le saut, dans le cas où un ressort linéaire serait utilisé, ce ressort devrait avoir une constante de rigidité (raideur) d'au minimum 1160 N/m et ce, en considérant que le robot quitte le sol au moment où le ressort passe par le point d'équilibre.

Avec ce modèle, il faudrait vérifier que le robot ne quitte pas le sol prématurément. En effet, le robot pourrait quitter le sol avant que le ressort linéaire ne soit complètement détendu, ce qui reviendrait à dire qu'une partie de l'énergie emmagasiné par le ressort n'aurait pas été convertie en énergie cinétique. Comme une grande partie du "Travail" (W) utile s'effectue au dernier moment avant le saut, un saut prématuré affecterait grandement les performances du système pour ainsi réduire la portée du robot. Tel que mentionné par Hale et al. [9], ainsi que dans "*Mechanical Engineering Design*", un phénomène de non-linéarité présent dans les ressorts "linéaires" et appelé "phénomène d'ascension subite" ou "surge phenomena" existe. Des essais effectués sur ce type de ressort ont démontré que dans la plupart des cas, un décollage prématuré est obtenu, limitant ainsi la conversion de l'énergie emmagasinée dans le ressort en énergie utile au saut. De plus, toujours dans l'article de Hale et al., plus la force F_R (force dans le ressort) excède la force " mg " (masse sous l'effet de la gravité) en début de déploiement, plus les chances d'obtenir un décollage prématuré sont grandes.

Le graphique A5 montre l'évolution de la force (Kx) produite par le ressort en fonction du temps pour le cas présent.



Graphique A5 Évolution de la force (N) produite par le ressort en fonction du temps (secondes)

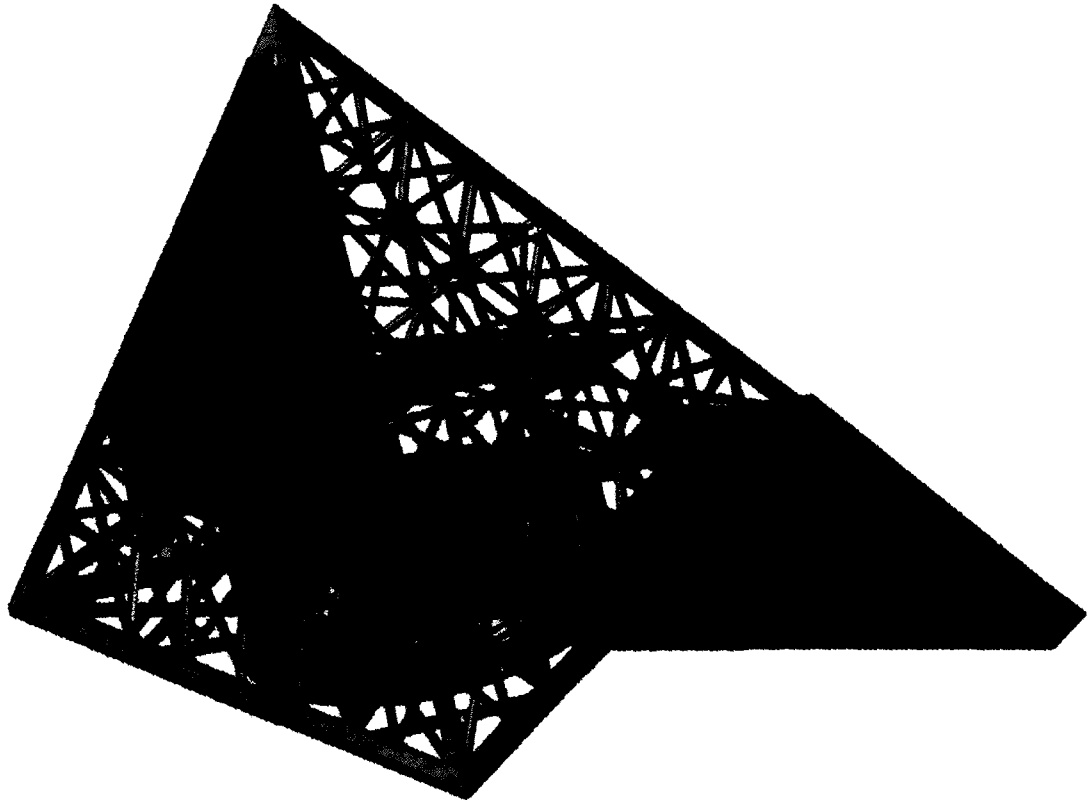
Au temps zéro, c'est-à-dire à $t=0$ seconde nous obtenons:

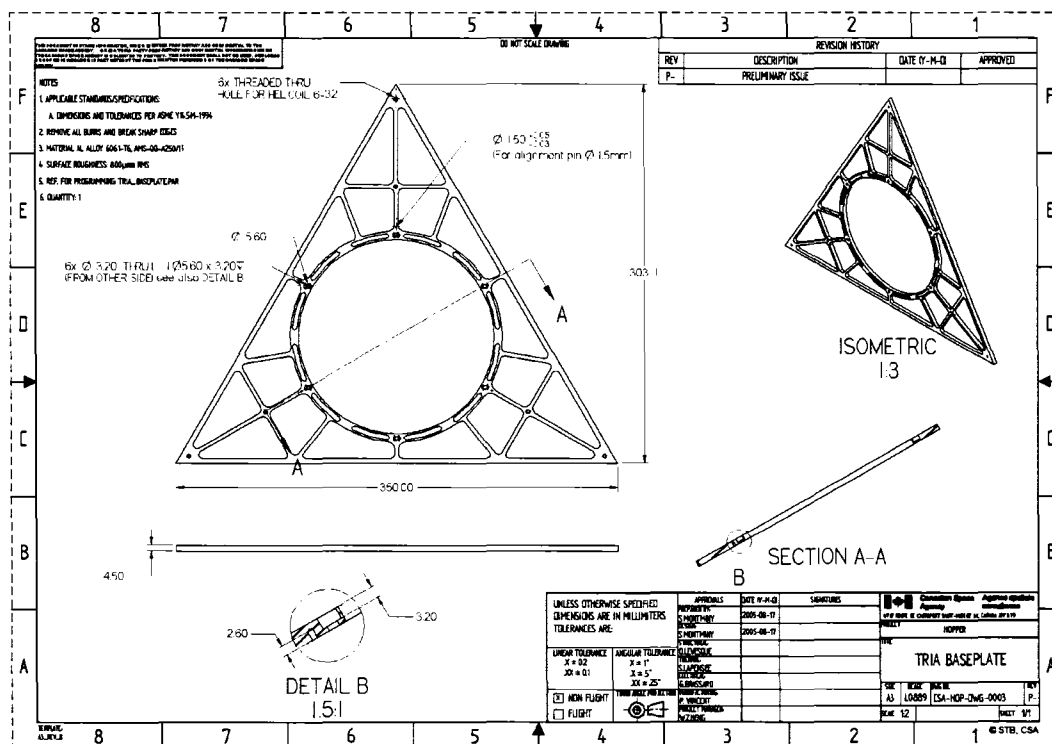
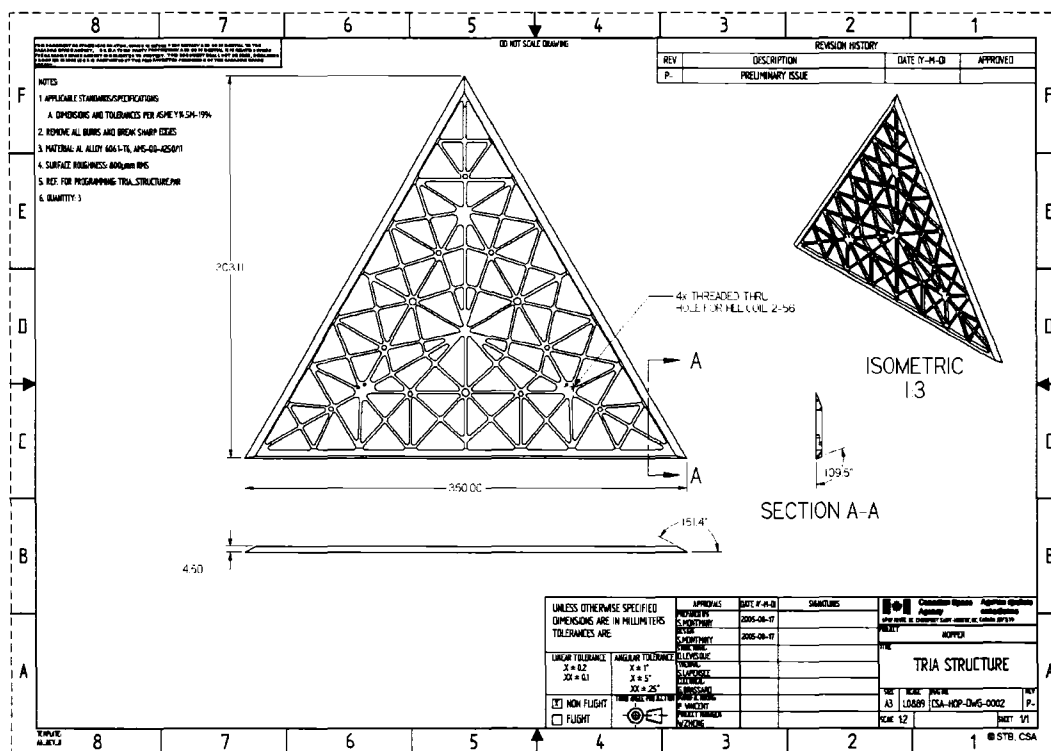
$$F_R \approx 116\text{ N} \gg mg = 3.7\text{ N}$$

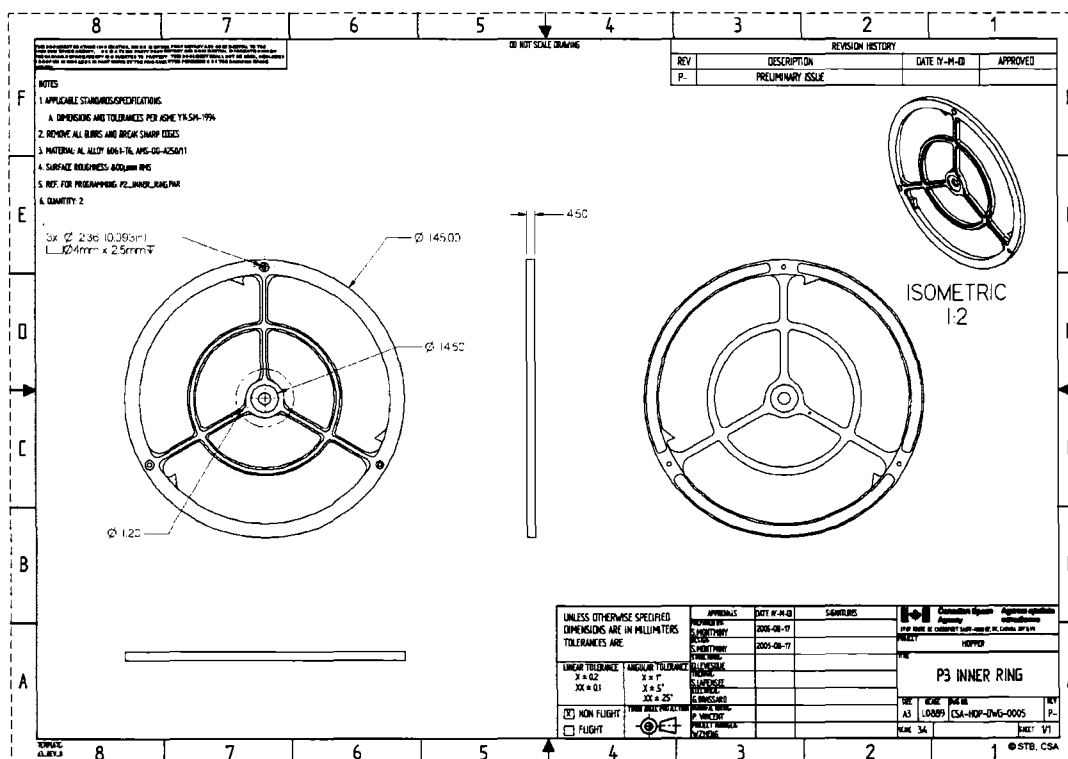
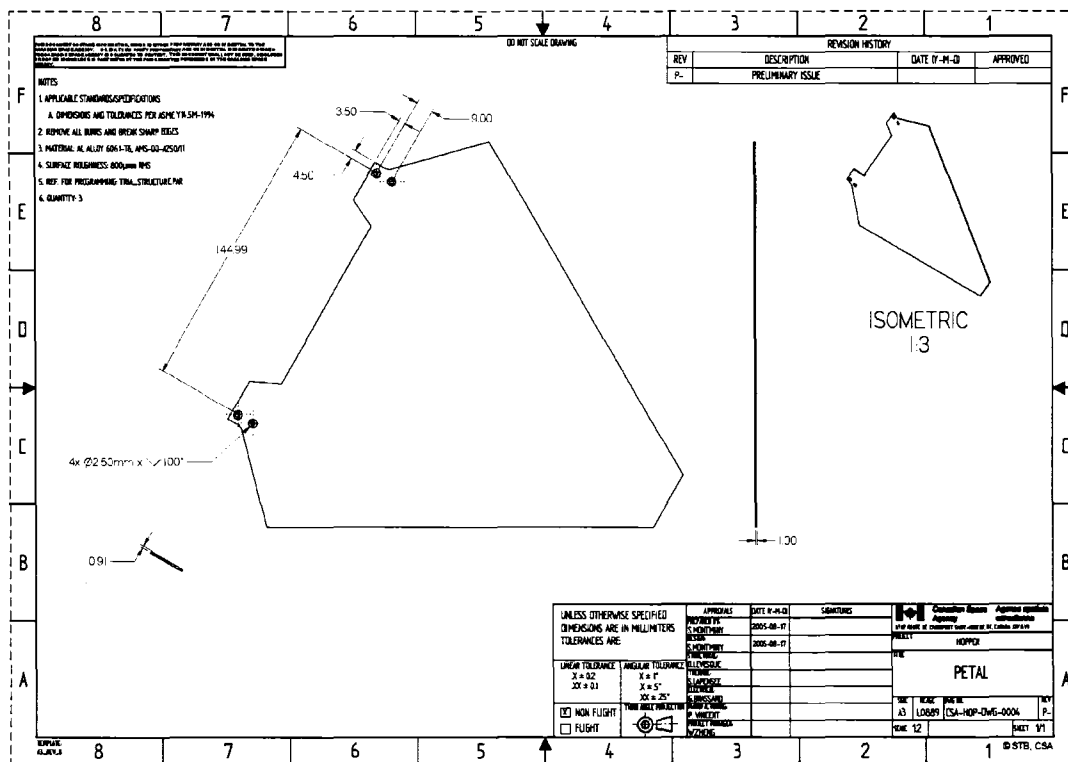
La poussée que le ressort procure au robot lors de l'amorce du déploiement est largement supérieure à la charge générée par le poids du robot. Il serait donc très risqué d'utiliser un système à ressort linéaire afin de propulser le robot dans les airs. Il faut toutefois noter que l'étude présentée ci-haut ne tient pas compte de la masse du ressort. Un ressort ayant une amplitude d'environ 100 mm et une constante de rigidité d'environ 1160 N/m ce, tout en étant assez compact pour entrer dans l'enveloppe de 250 mm x 250 mm x 250 mm décrite précédemment n'est pas chose facile à trouver. De plus, la masse de ce dernier n'est pas négligeable et elle risquerait de largement affecter la conception. Pour avoir une meilleure idée de l'impact du ressort et de sa masse, il faudrait refaire le même exercice en ajoutant la masse de ce dernier dans nos calculs.

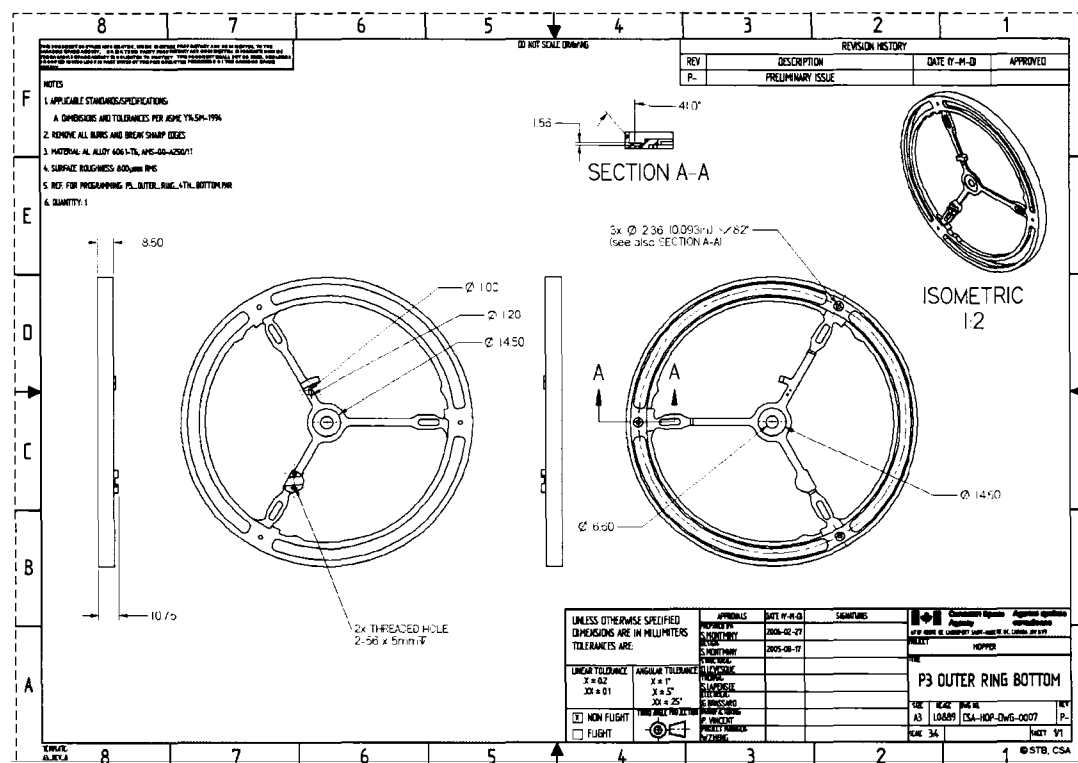
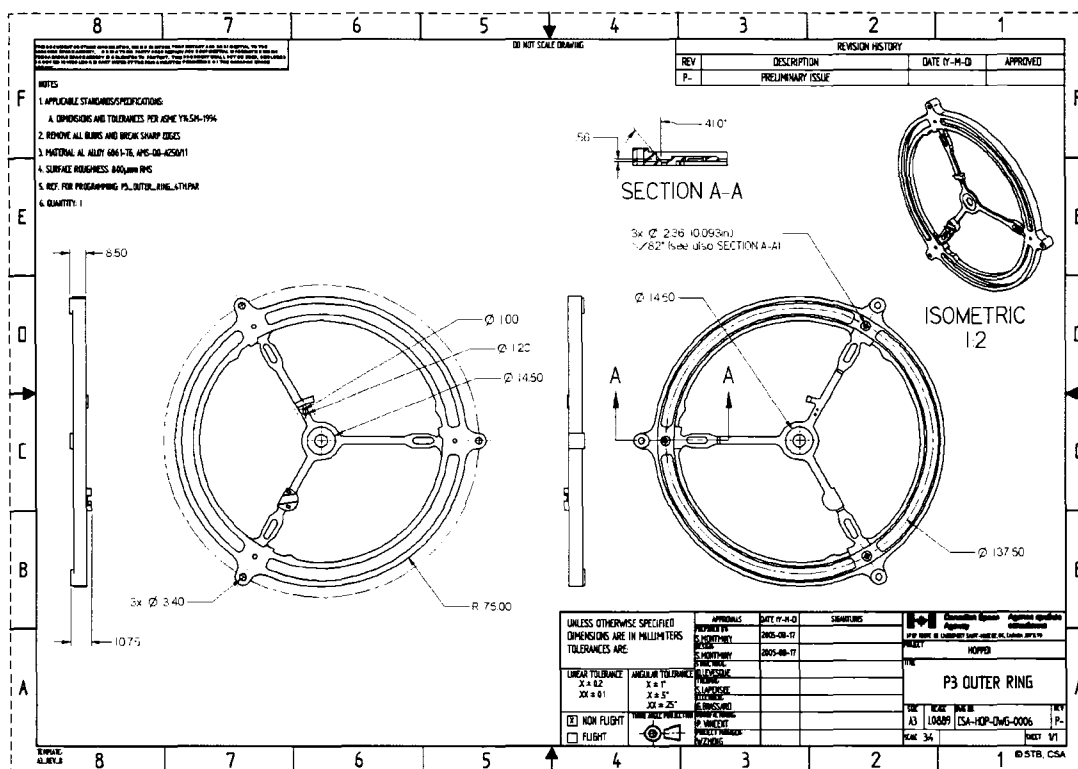
ANNEXE 3

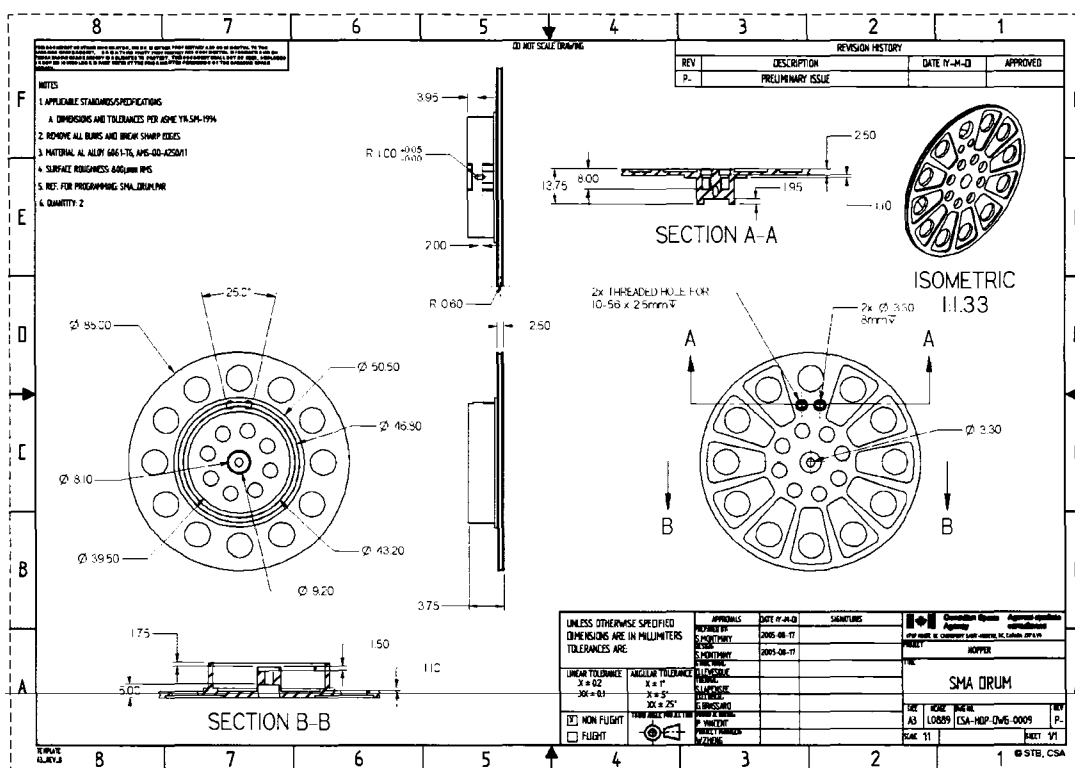
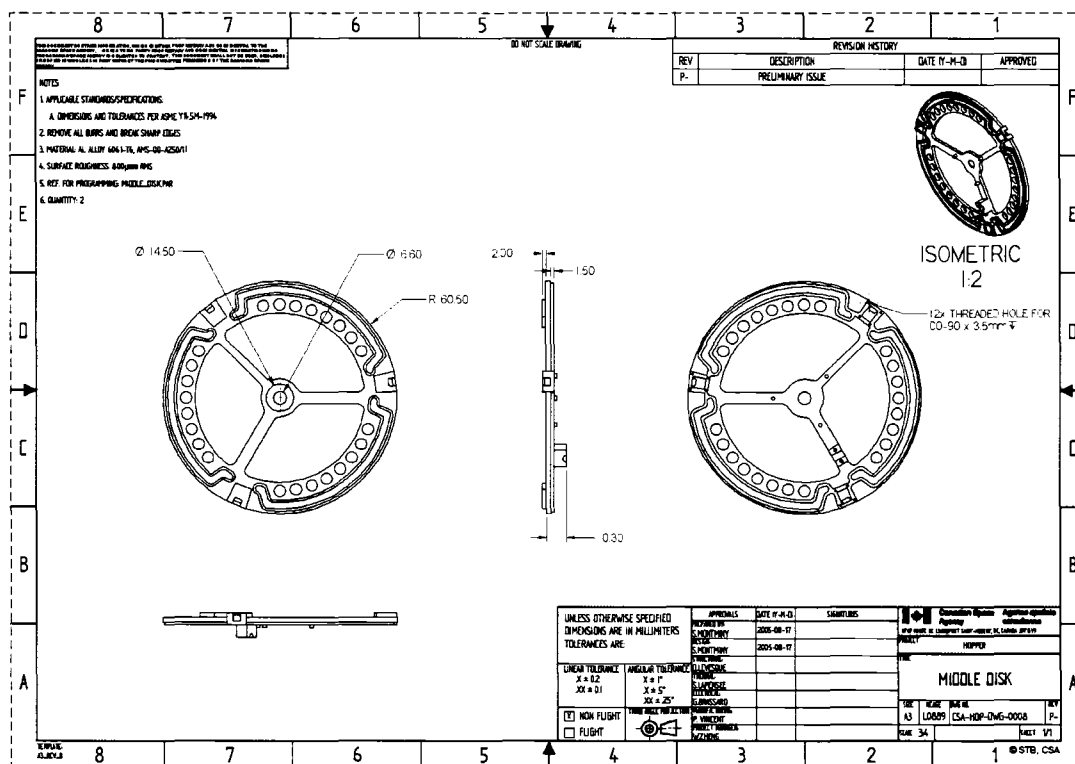
Dessins et informations reliés à la fabrication du robot

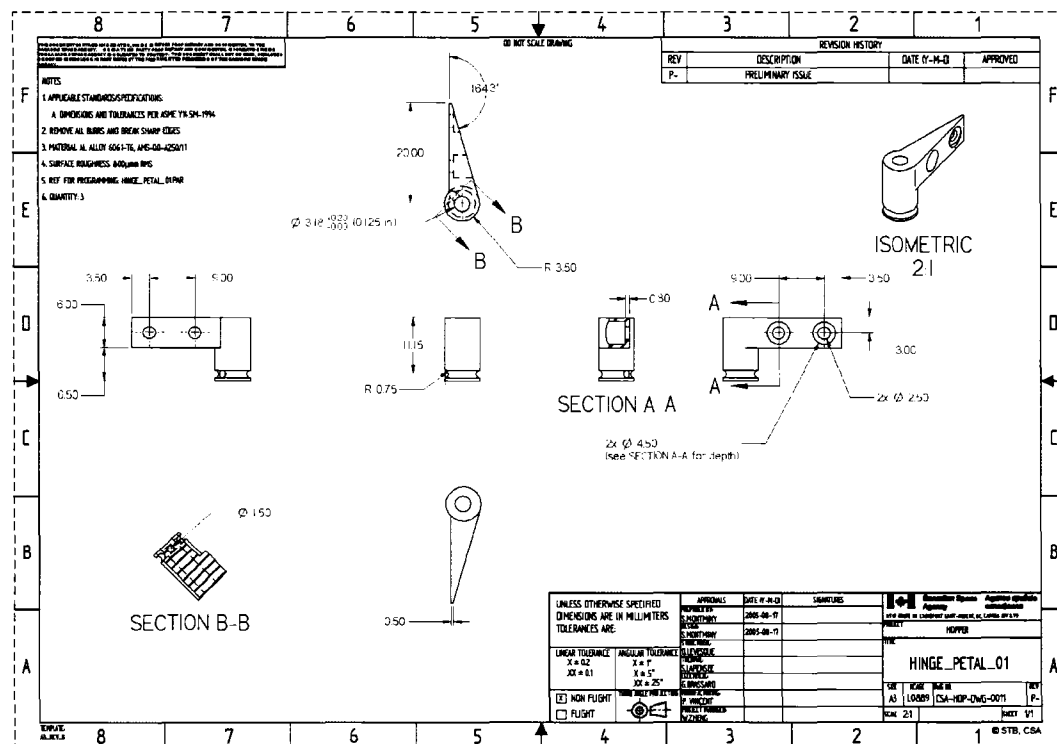
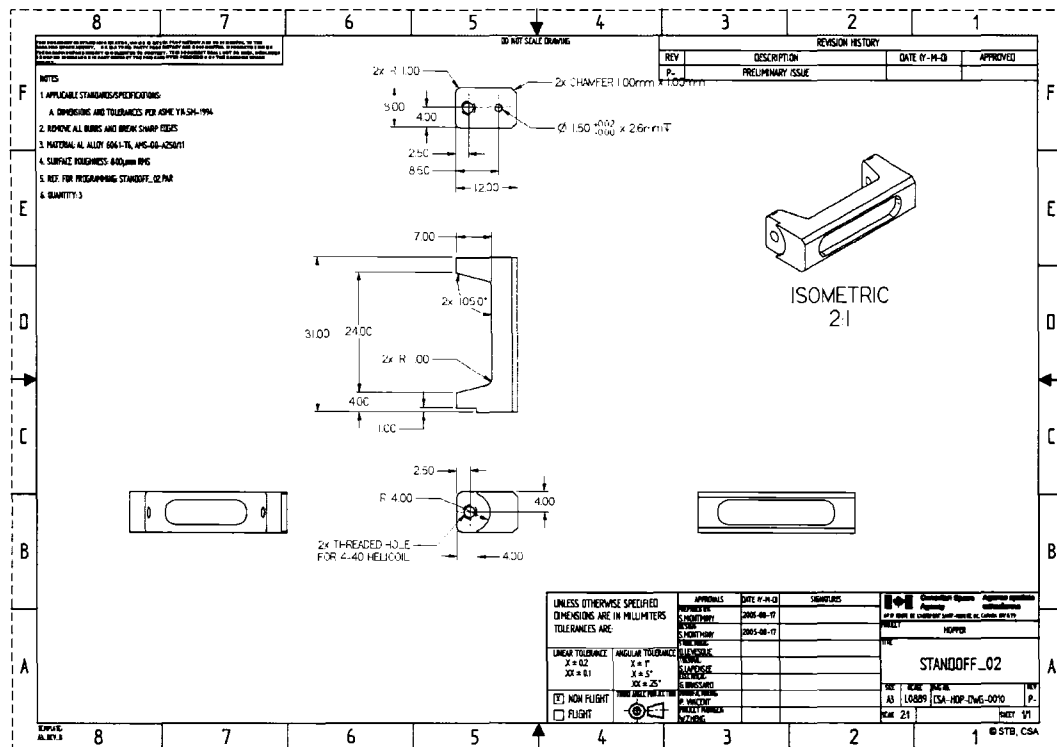


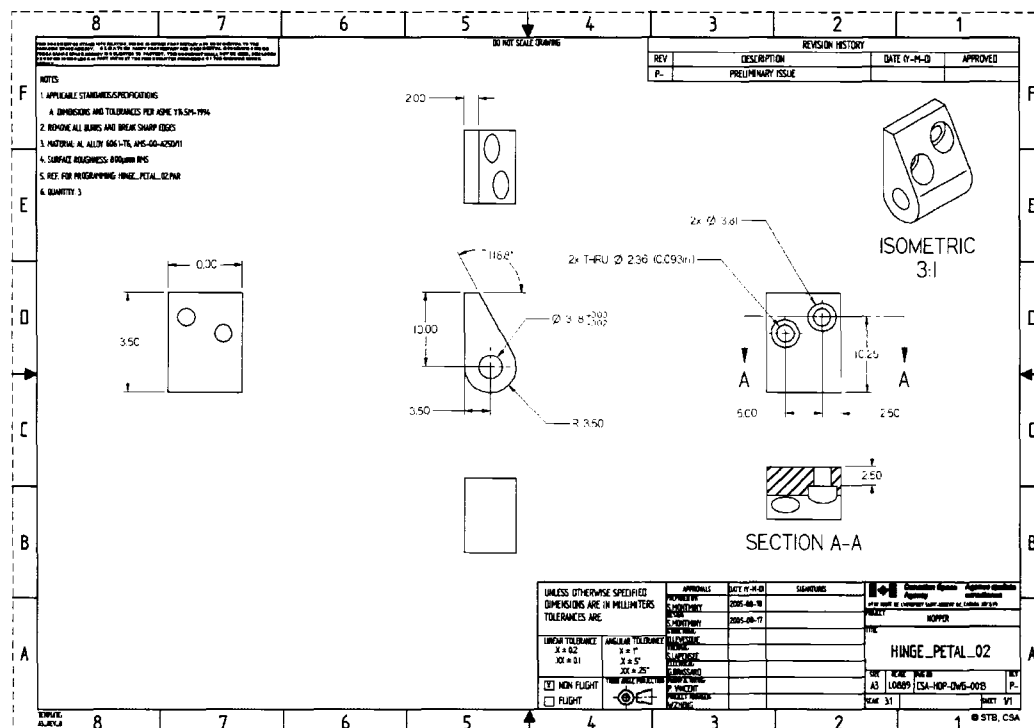
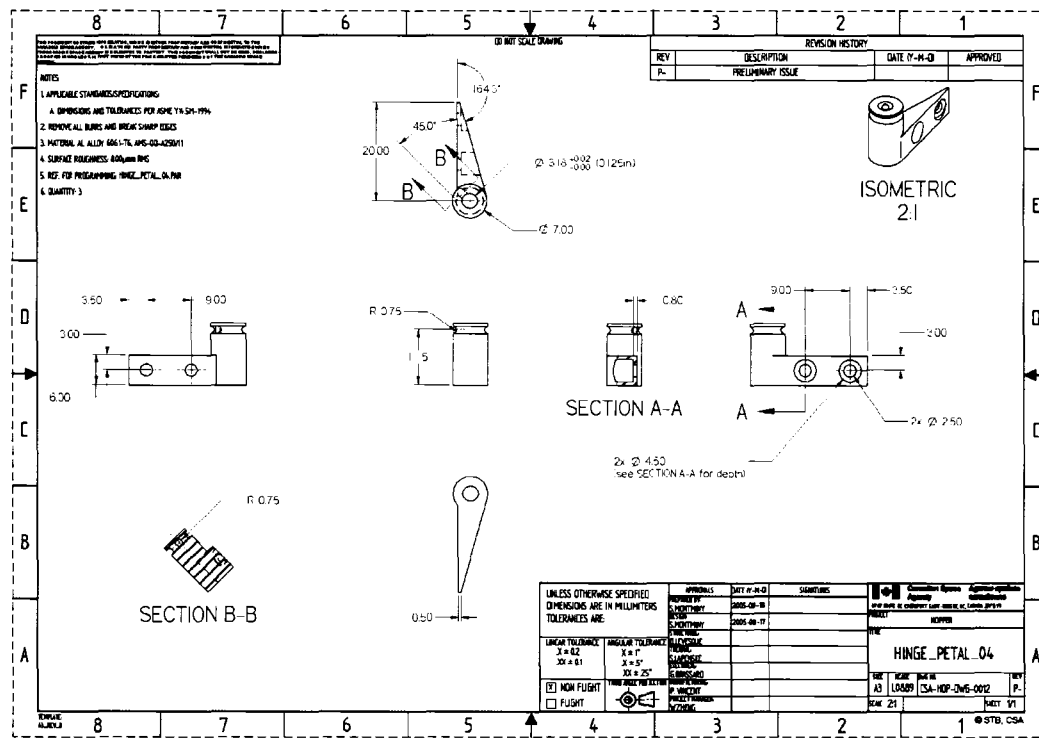


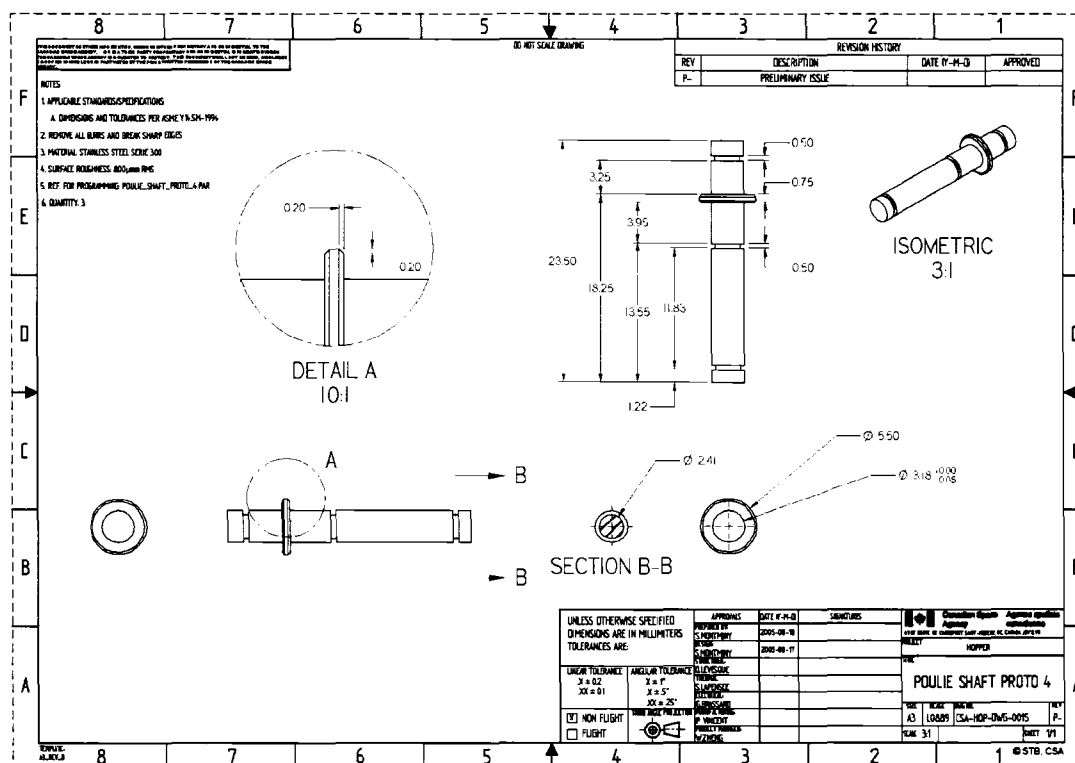
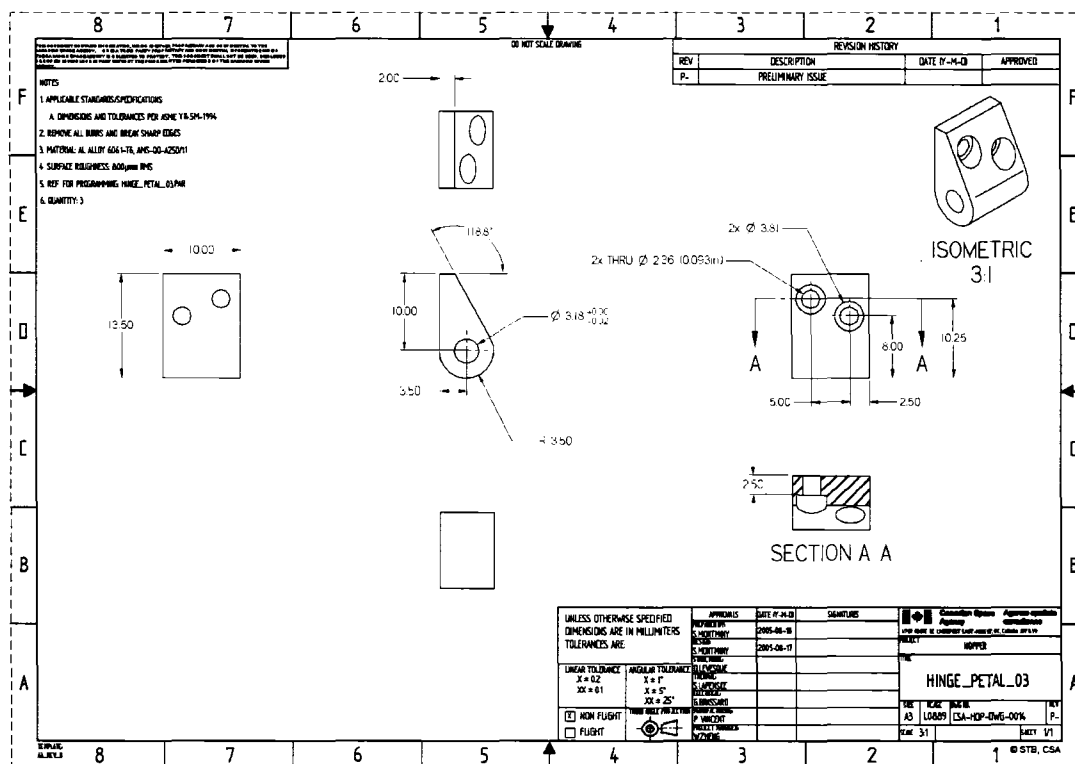


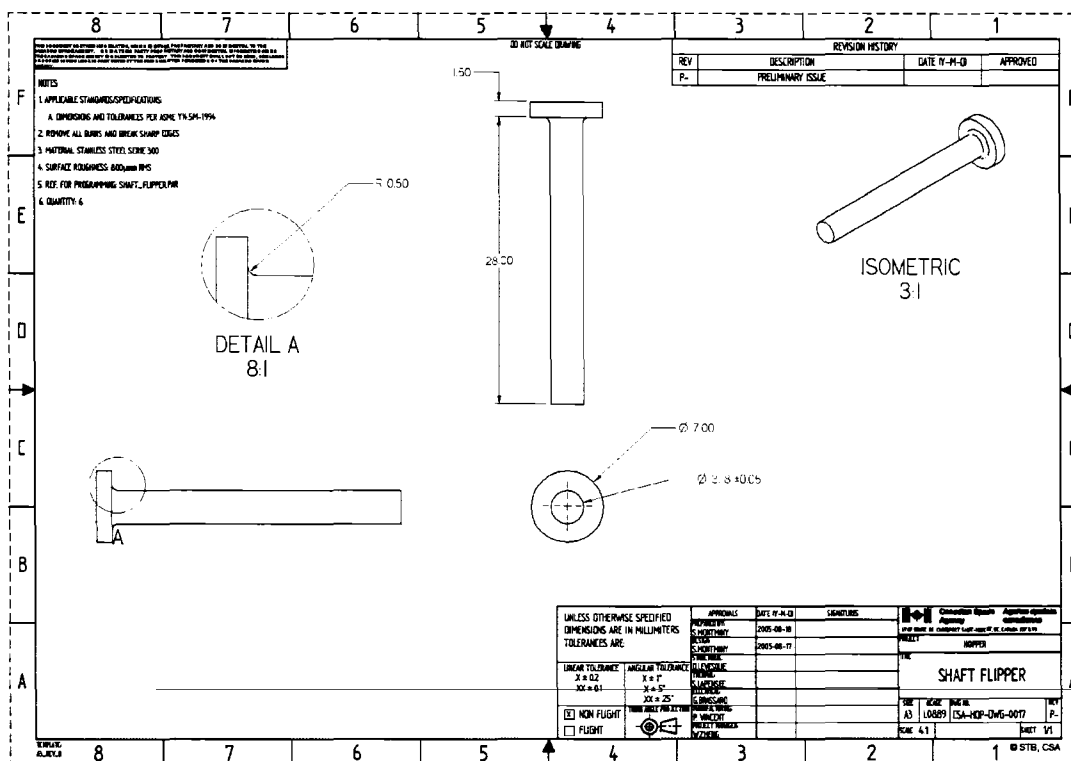
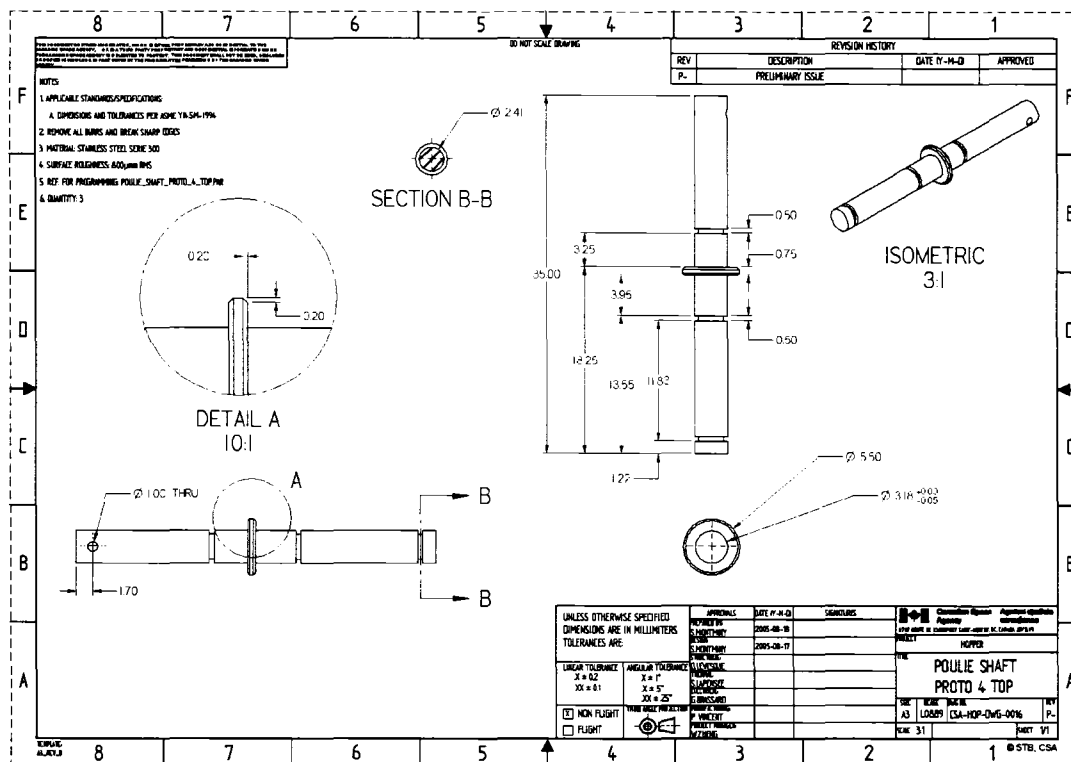


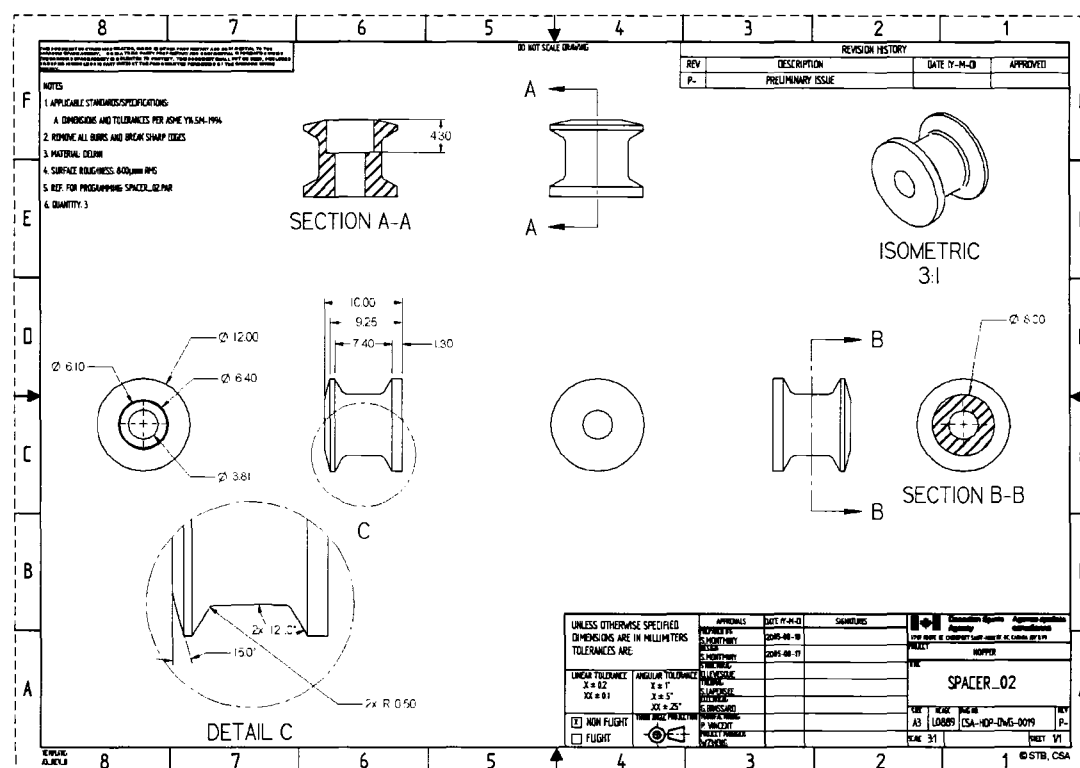
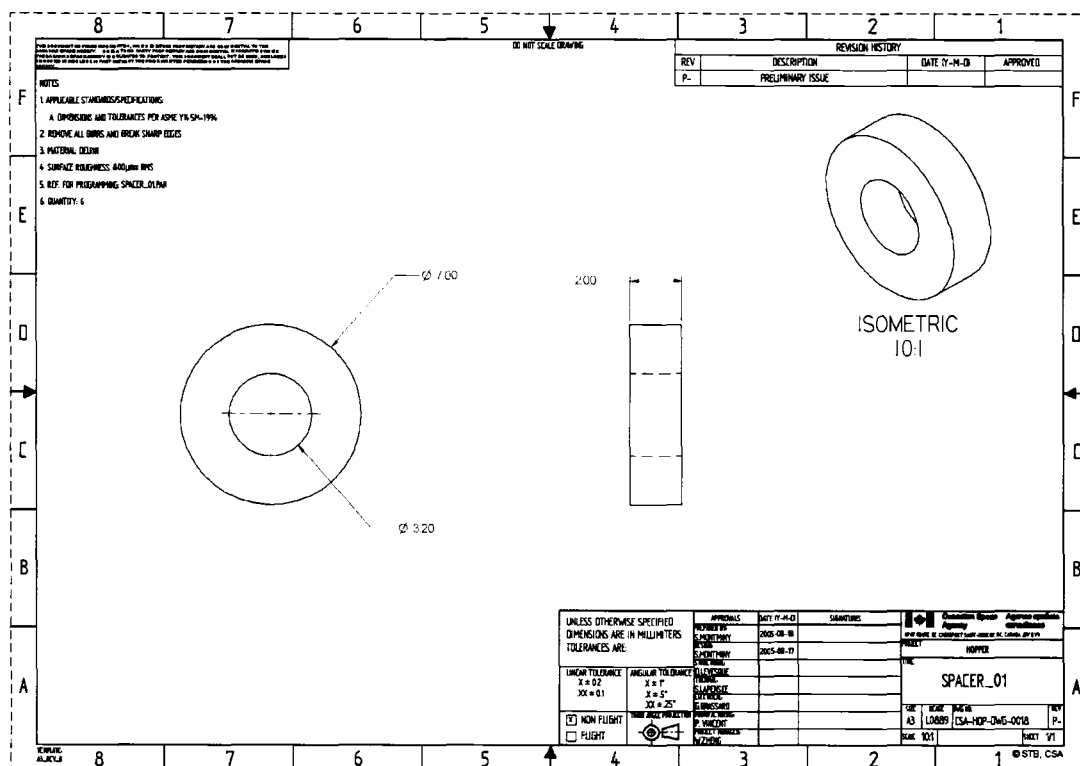


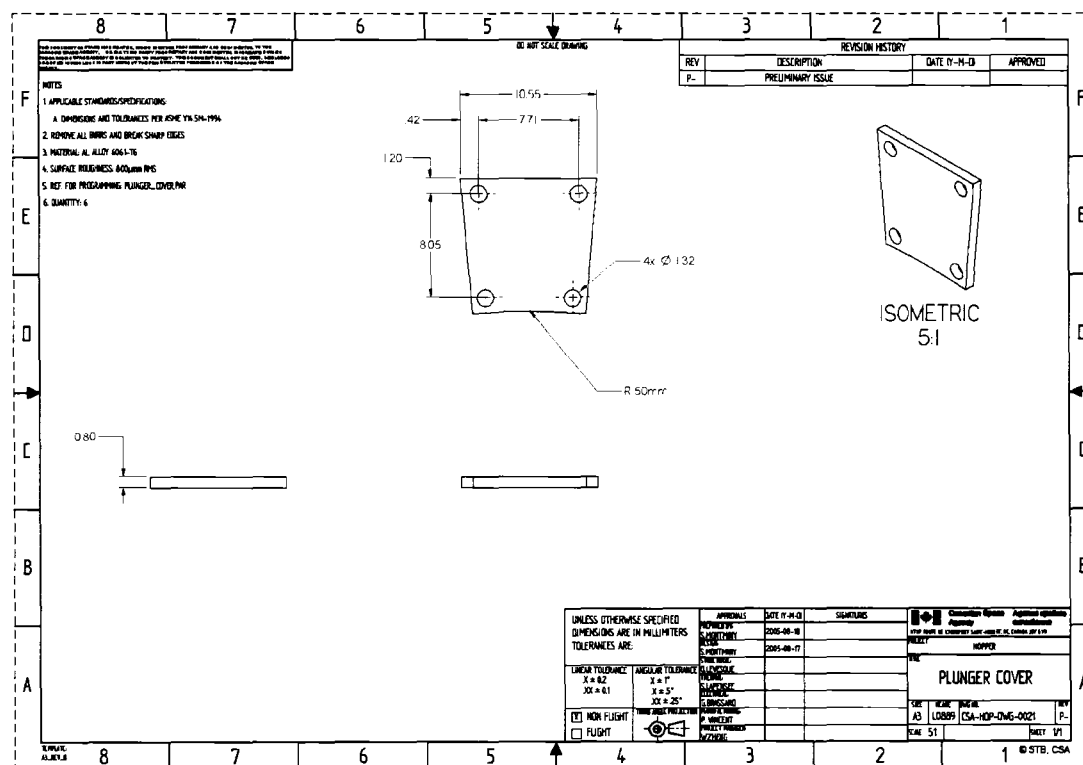
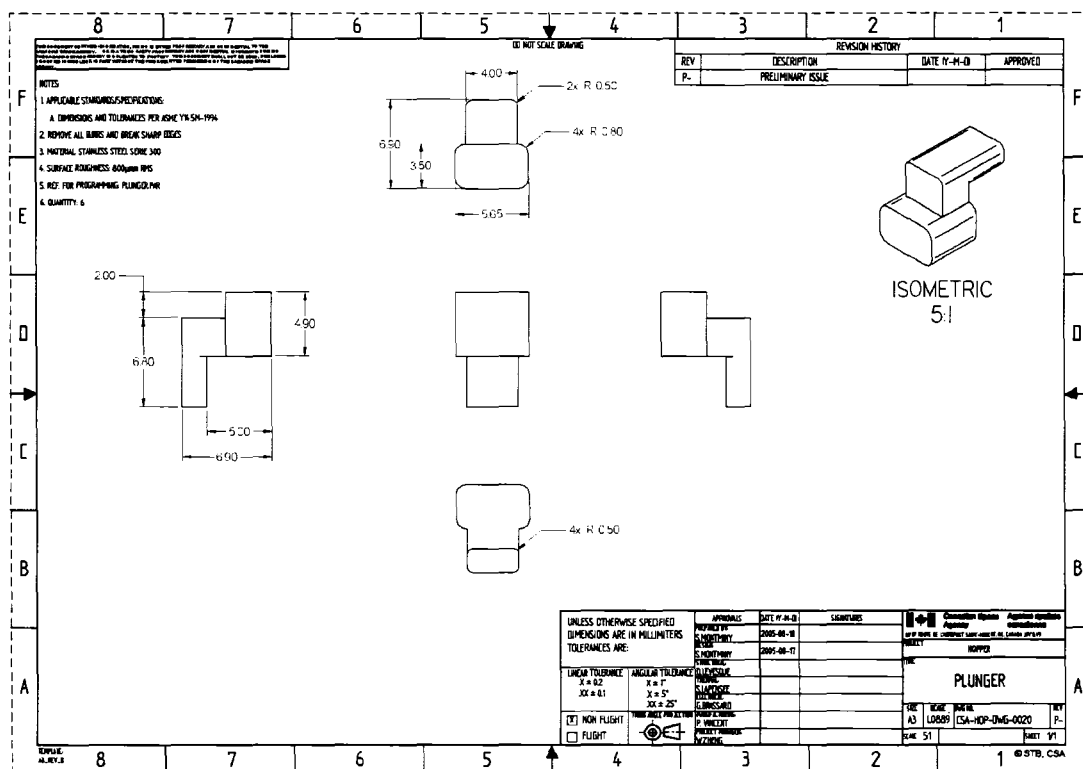


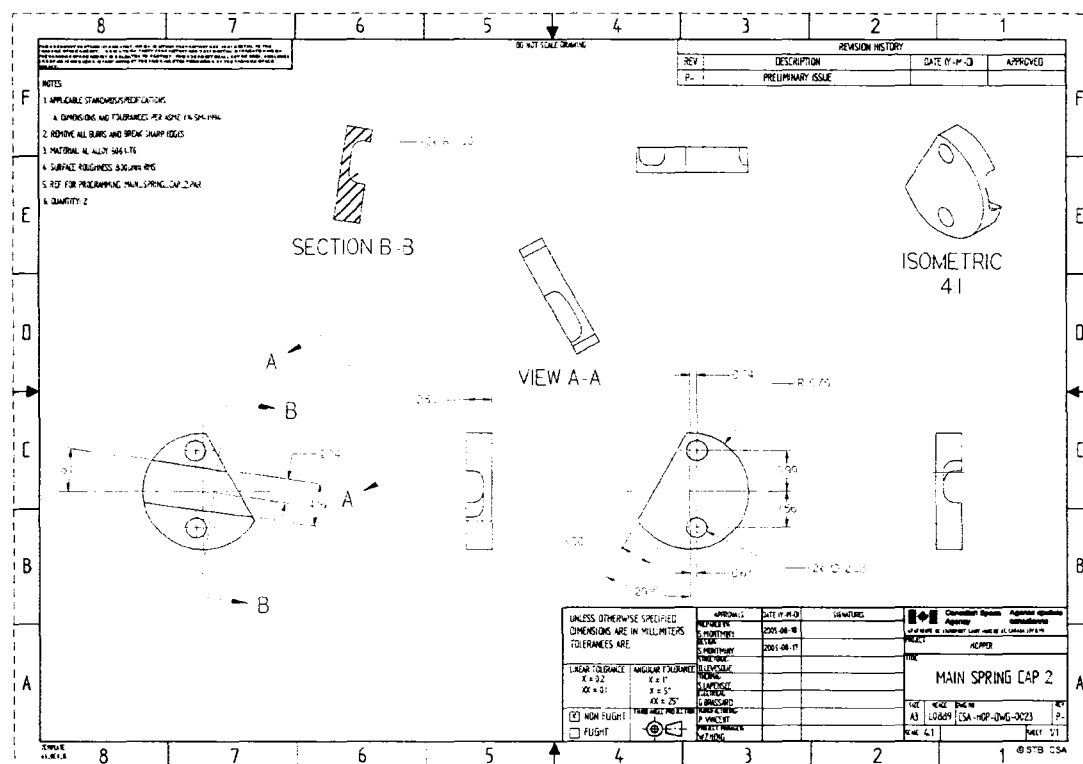
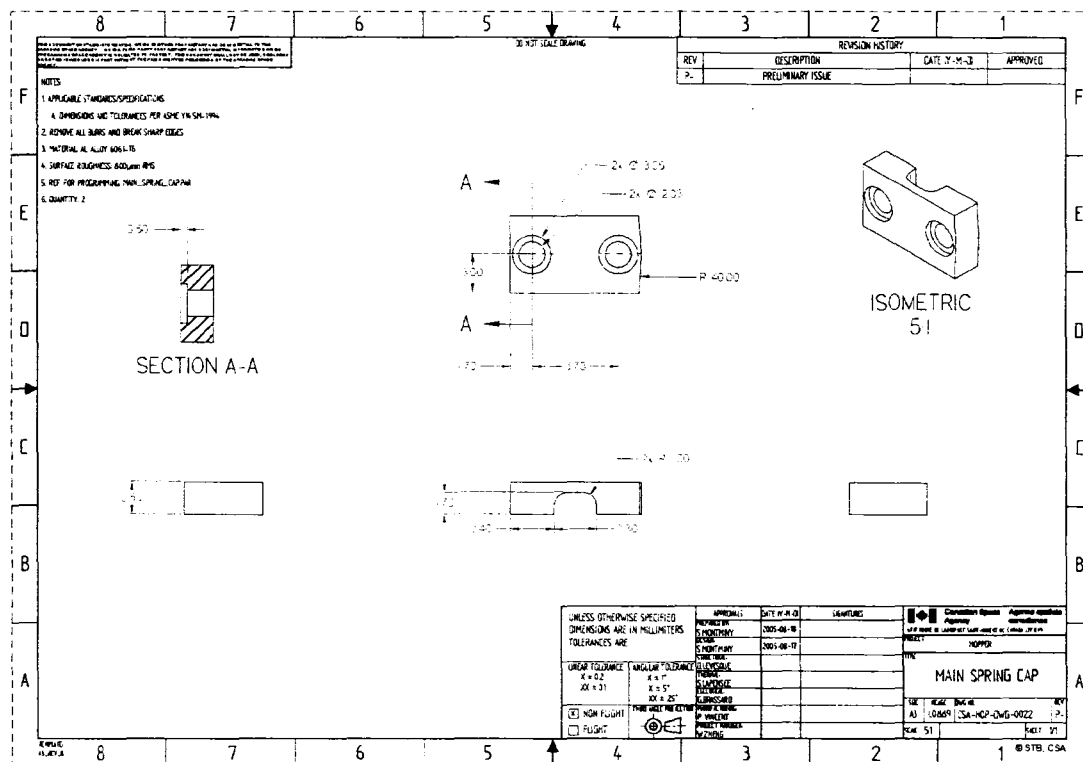


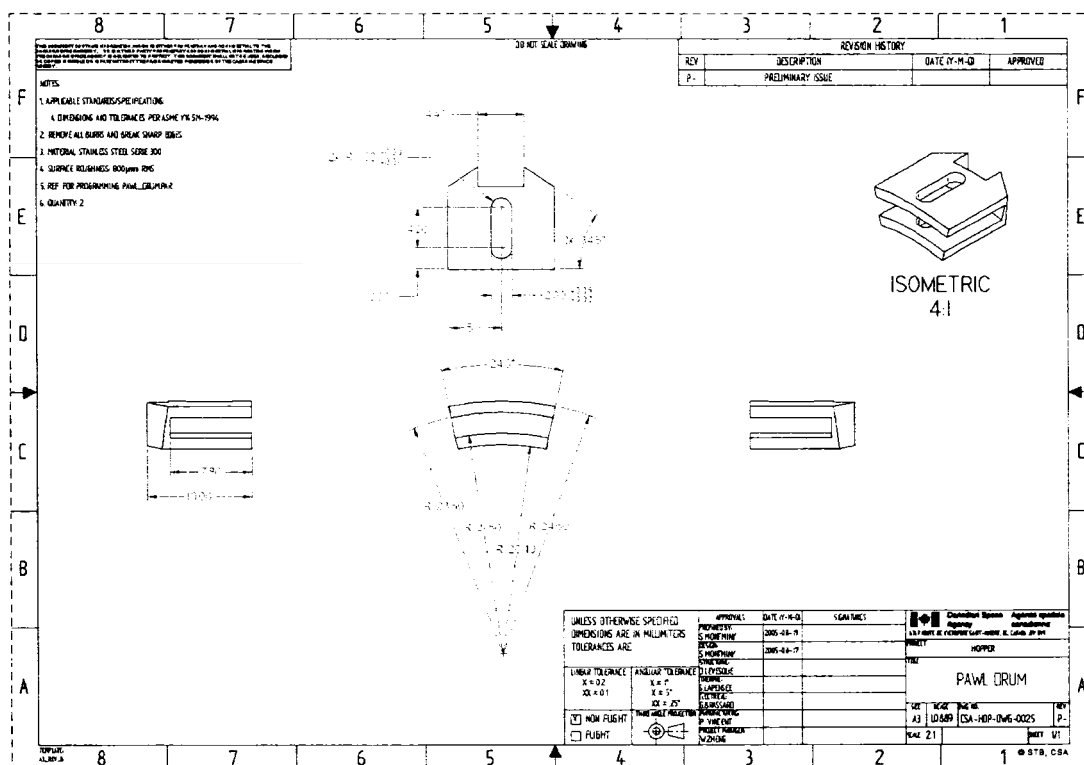


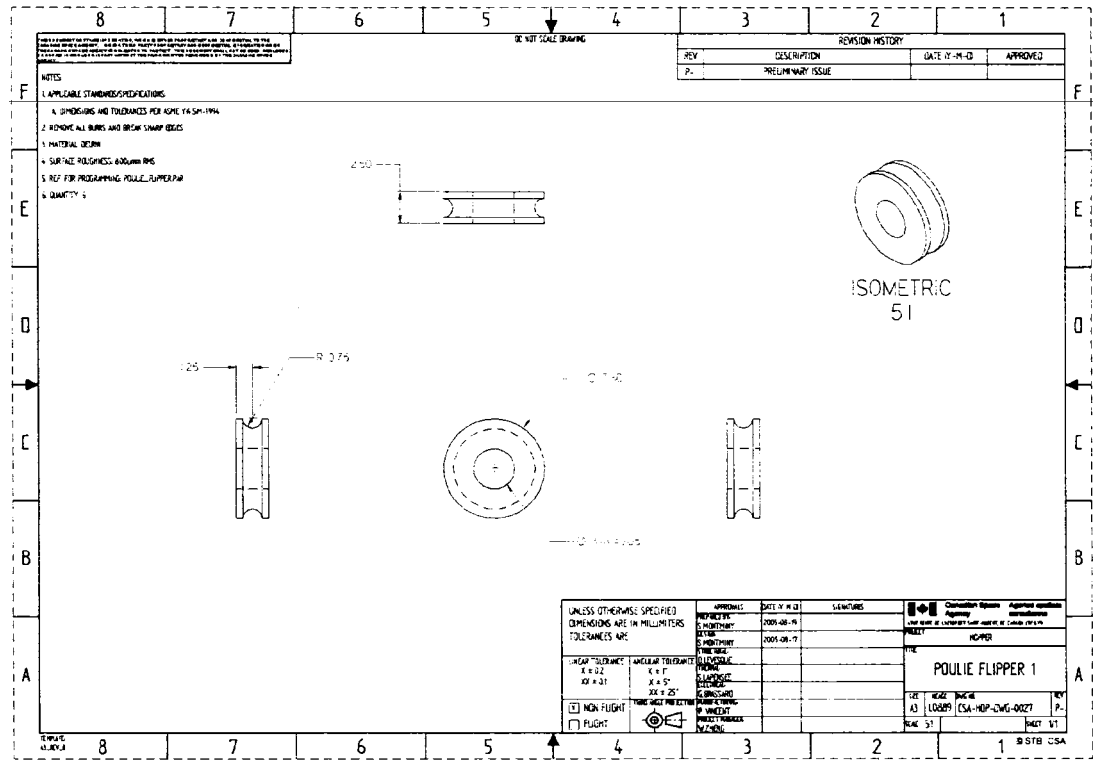
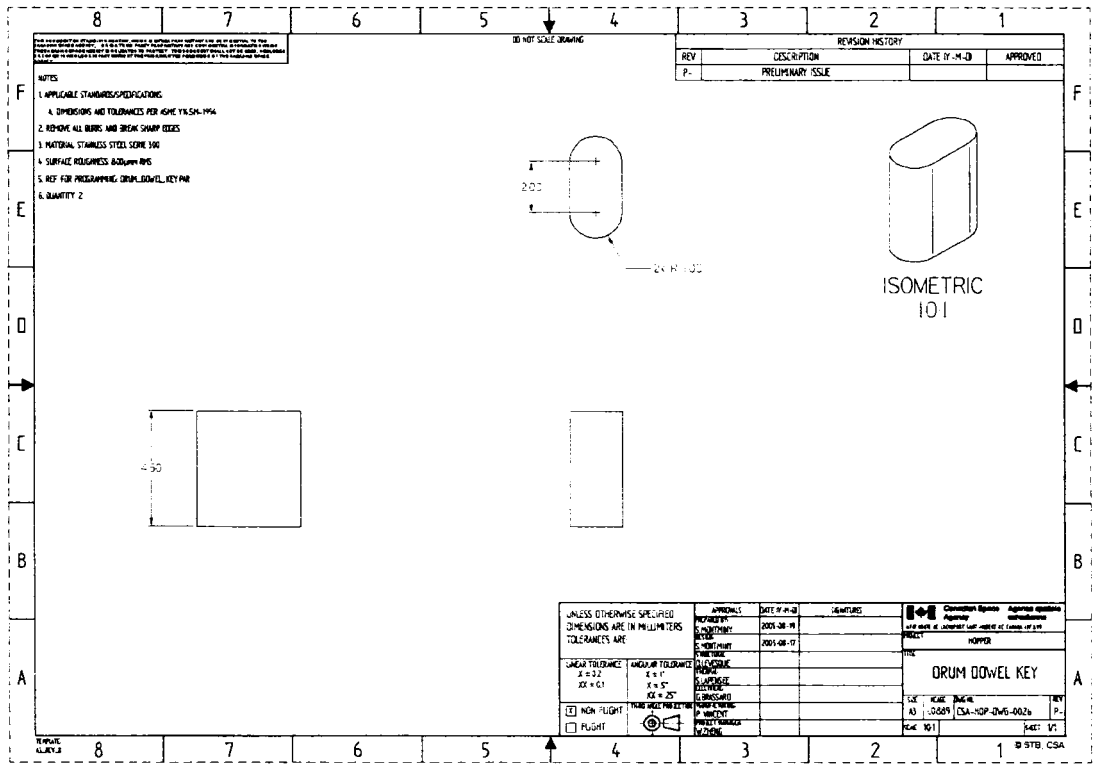


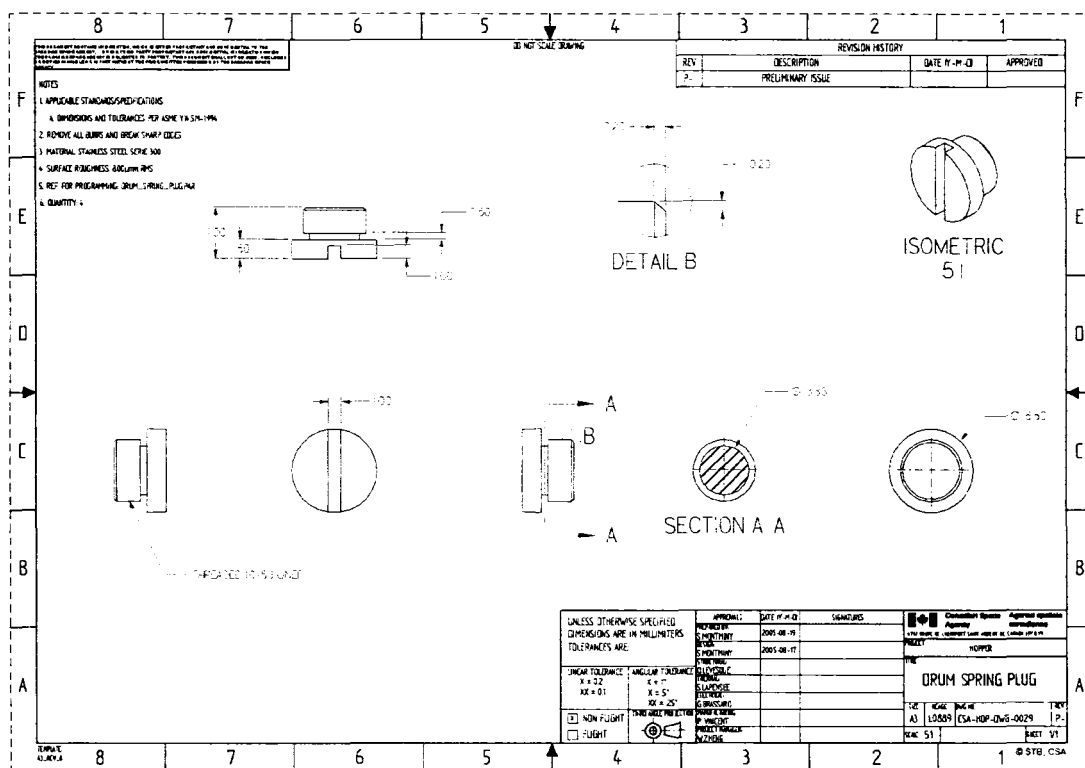
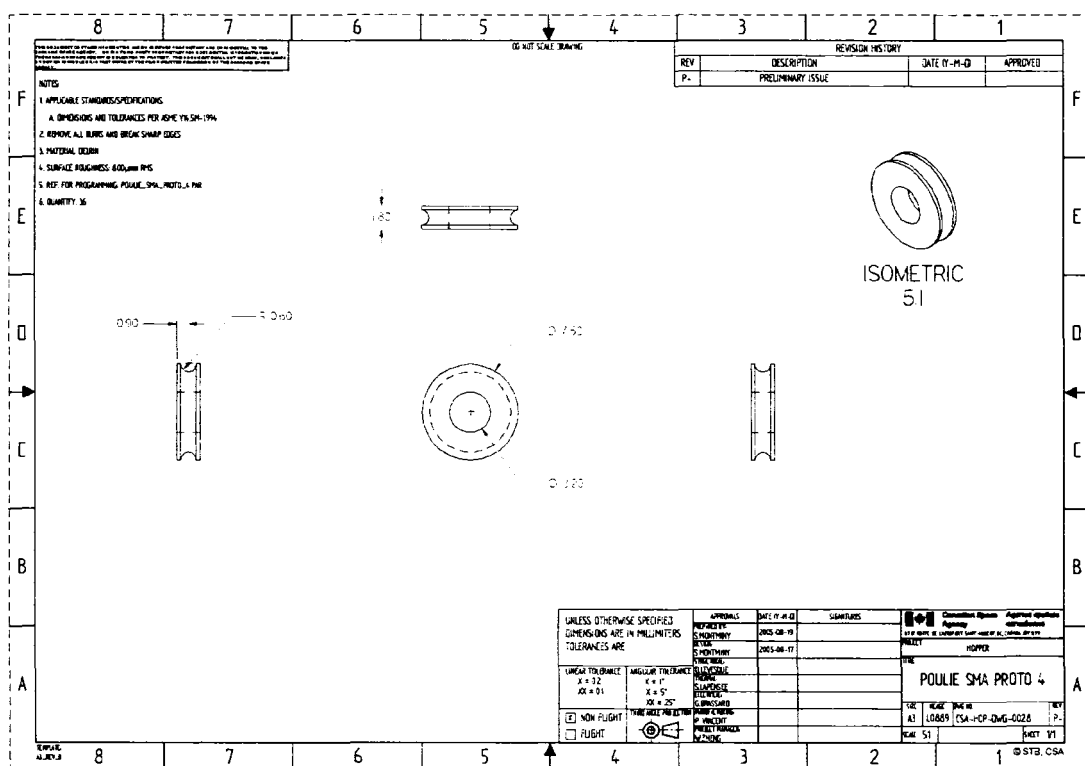


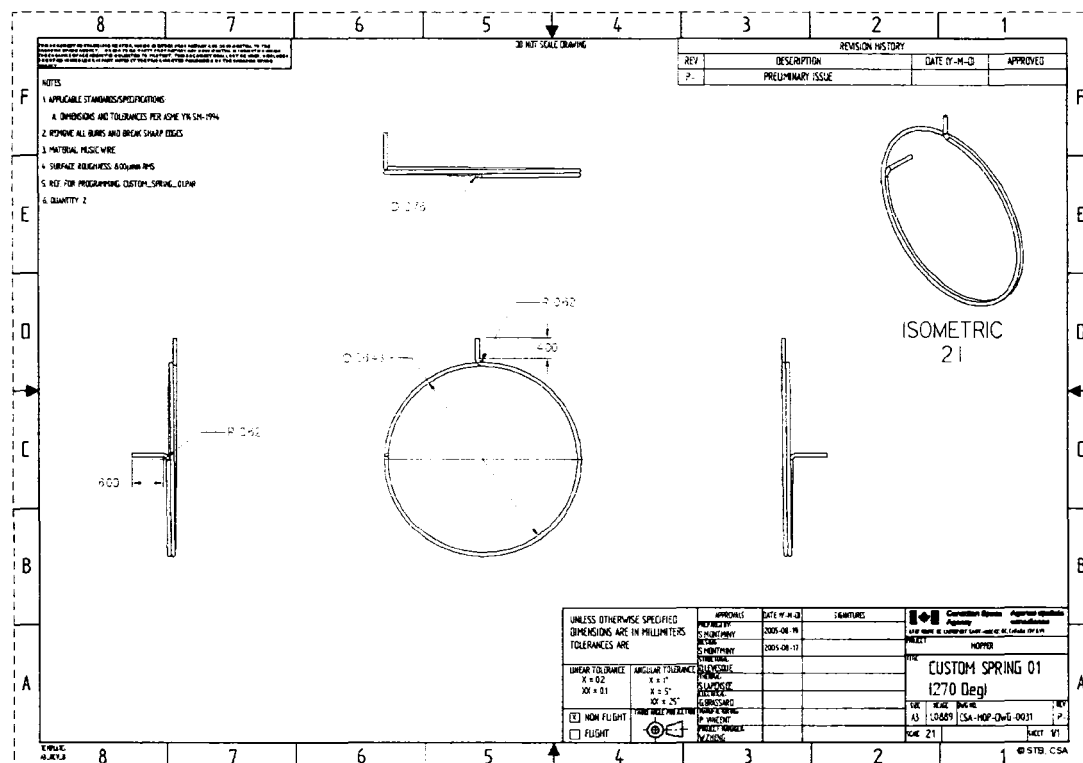
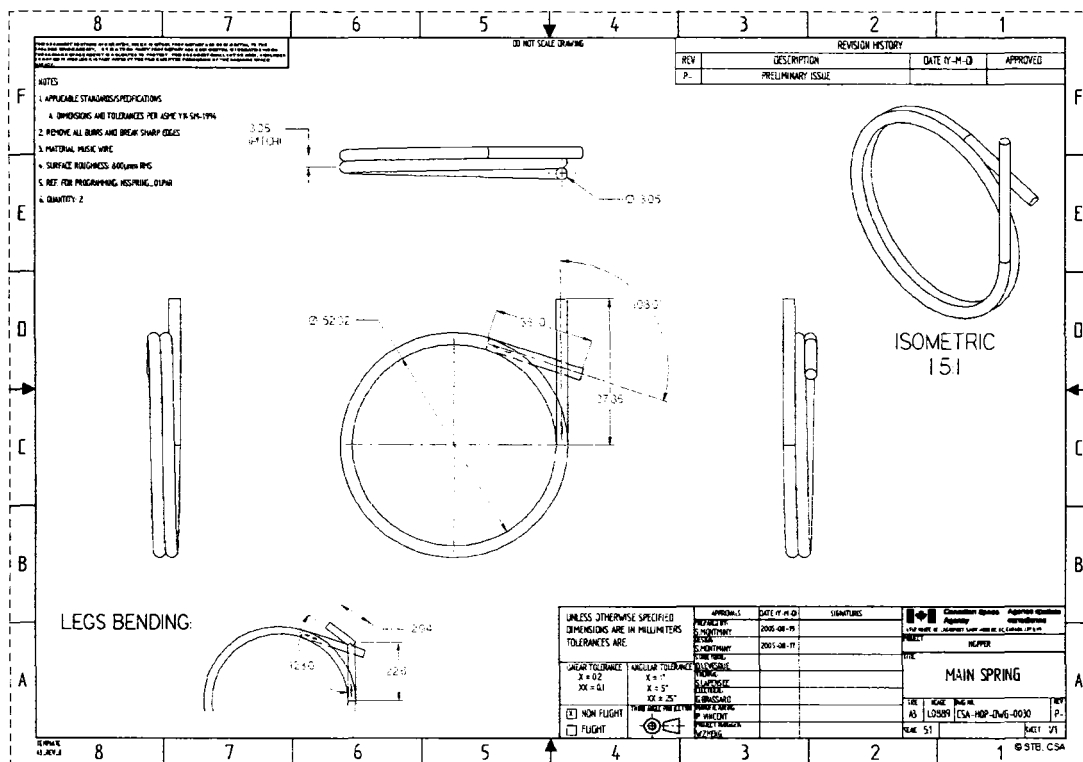


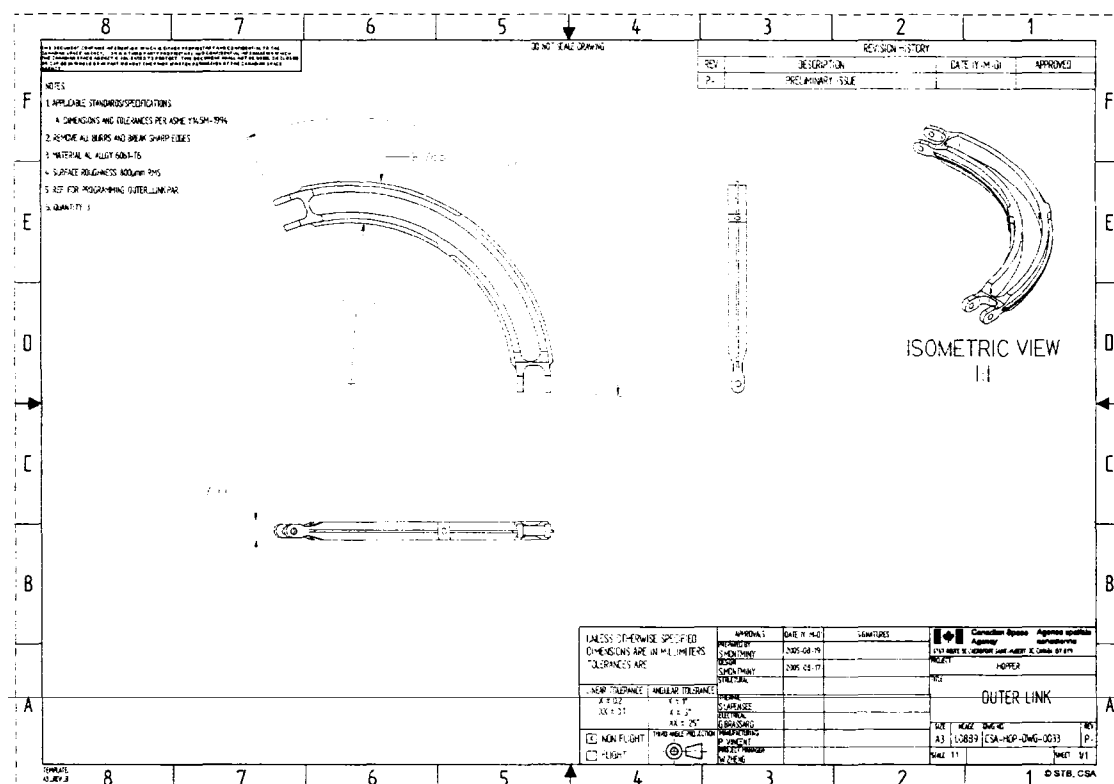
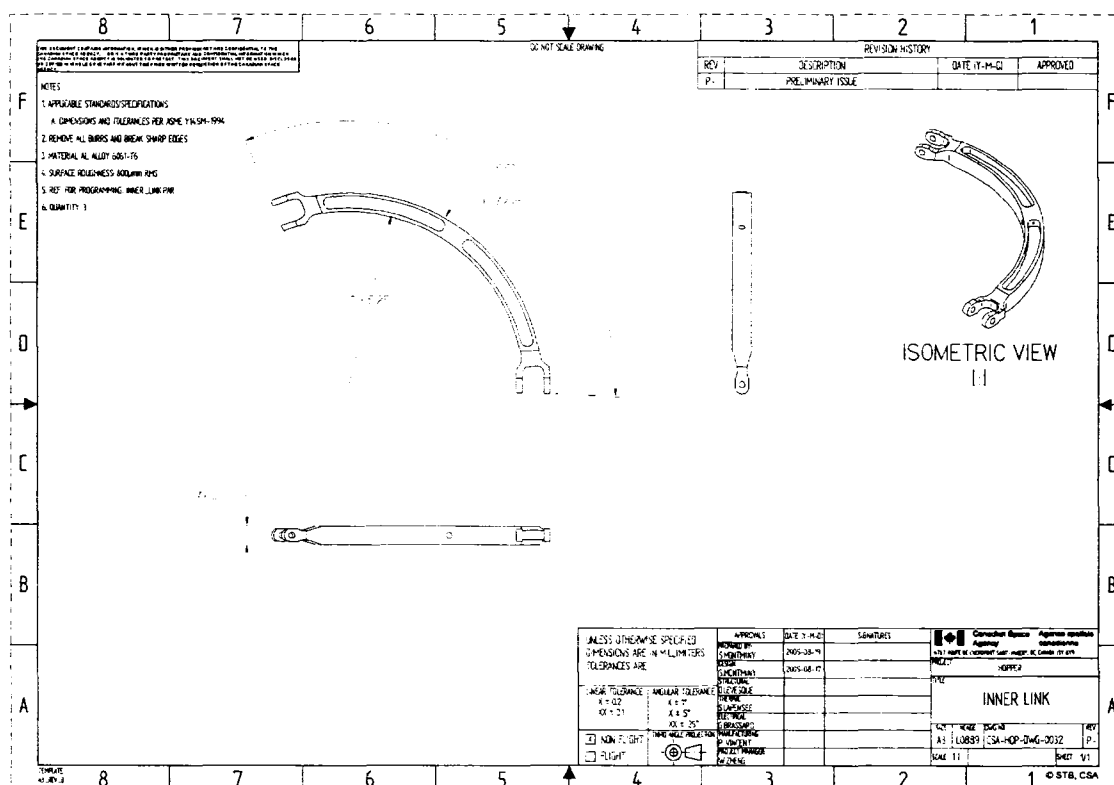












BIBLIOGRAPHIE

- [1] Allard, P. (2002), *Thermally Wound Hopping Robot Calculations* (initial draft), Mars Program, Department of Space Technologies, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, J3Y 8Y9.
- [2] Bennet-Clark, H.C. (1975). The Energetics of the Jump of the Locust *Schistocerca Gregaria*, *The journal of experimental biology*, 63, 53-83
- [3] Birch, M.C.; Quinn, R.D.; Hahm, G.; Phillips, S.M.; Drennan, B.T.; Fife, A.J.; Beer, R.D.; Xinyu Yu; Garverick, S.L.; Laksanacharoen, S.; Pollack, A.J.; Ritzmann, R.E. (2002) Cricket-based robots, *Robotics & Automation Magazine, IEEE* , vol.9, no.4 pp. 20-30
- [4] Brown, H.B., Zeglin, G.Z. (1998), The Bow Leg Hopping Robot, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 793-798.
- [5] Sclater, N. and Chironis, N.P. (2001) *Mechanisms and Mechanical Devices-Sourcebook*, third edition, McGraw Hill.
- [6] Chou, C., Hannaford, B. (1996). Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.12, pp. 90-102.
- [7] Fiorini, P., Hayati, S., Heverly, M., and Gensler, J. (1999). A hopping robot for planetary exploration. *In proceeding of IEEE Aerospace Conference*, Snowmass, CO.
- [8] Fischer, G.J. (2003). Long range hopping mobility platform, In proceedings of SPIE- *The International Society for Optical Engineering*, vol. 5083, pp. 83-92
- [9] Hale, E., Schara, N., Burdick, J., Fiorini, P. (2000), A minimally actuated hopping rover for exploration of celestial bodies, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 420-427.
- [10] Hayashi, R., Tsujio, S. (2001). High-performance jumping movements by pendulum-type jumping machines, in proceedings of IEEE *Intelligent Robots and Systems International Conference on* , vol.2, pp.722-727.
- [11] Hodgson, D., Brown, J. (2000), *Using Nitinol Alloys*, Shape Memory Applications inc., San Jose, CA, U.S.A.

- [12] Hull, P.V., Canfield, S.L., Carrington, C. (2004), A radiant-powered shape memory alloy actuator, *Department of Mechanical Engineering*, Tennessee Technological University, Cookeville, U.S.A., *Mechatronics* 14, pp. 757-775.
- [13] Hunter, I.W., Lafontaine, S. (1992). A comparison of muscle with artificial actuators, *Proceedings of Sensors and Actuators*.
- [14] Hyon, S.H.; Mita, T. (2002). Development of a biologically inspired hopping robot-"Kenken", in proceedings of *Robotics and Automation, 2002, IEEE International Conference* , vol.4, pp. 3984- 3991.
- [15] Ishii, H., Ting, K-L. (2004) SMA actuated compliant bistable mechanisms, *Mechatronics*, vol. 14, No 4, pp.421-437.
- [16] Kaplan, M.H., Seifert, S.H. (1969). Hopping Transporters for Lunar Exploration, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 6, N. 3, pp. 917-922.
- [17] Khajepour, A., Dehestani, H., Golnaraghi, F. *A new Shape Memory Alloy Rotary Actuator: Design and modeling*, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L 3G1.
- [18] Koditschek, D. and Bulher, M. (1991). Analysis of a simplified hopping robot. *International Journal of Robotics Research*, vol. 10, issue 6, pp. 587-605.
- [19] Kuribayashi, K. (1986), A New Actuator of a Joint Mechanism Using TiNi Alloy Wire, *The international Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 4, Massachusetts Institute of Technology.
- [20] Laksanacharoen, S., Quinn, R., Ritzmann, R. (2003). Modeling of Insect's Legs by Inverse Kinematics Analysis, *Proceedings of the second International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Kyoto.
- [21] Lapshin, V.V. (1992). Vertical and horizontal motion control of a one-legged hopping machine, *International Journal of Robotics Research*, 11(5).
- [22] Liang, C., Rogers, C.A. (1992), Design of Shape Memory Alloy Actuators, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 114/223.
- [23] Massachusetts Institute of Technology. *3D One-Leg Hopper (1983-1984)*, [En ligne].
http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/3D_hopper/3D_hopper.html
 (Consulté en juillet 2004).
- [24] M'Closkey, R. T., and Burdick, J. W. (1993). Periodic motion of a hopping robot with vertical and forward motion. *International Journal of Robotics Research* 12(3),197-218.

- [25] Nader, J., Wagner, J., Dadfarnia, M. (2002), A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with application to automotive engine valves, *Mechatronics and Automotive Research Laboratories*, Department of Mechanical Engineering, Clemson University, U.S.A., *Mechatronics* 13 (2003) pp. 933-956.
- [26] Oberth, H. (1959). *The Moon Car*, Harper and Brothers, New York.
- [27] Papantoniou, V.K. (1991). Electromechanical design for an electrically powered, actively balanced one leg planar robot, *Proceedings of IEEE conference on Intelligent Systems and Robots*, Osaka, Japan.
- [28] Rad, H., Gregorio, P. and Buehler, M. (1993) Design, Modeling and Control of a Hopping Robot, in proceeding of the International, *Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3:1778-1785.
- [29] Raibert, M.H. (1986), *Legged Robots that Balance*. Cambridge, MA: MIT Press, Reprint edition (April 2000), 233 pages.
- [30] Seifert, H.S. (1967) The Lunar Pogo Stick, *Journal of spacecraft and Rockets*, Vol. 4, N.7, pp. 941-943.
- [31] Stoeter, S., Burt, T., Papanikolopoulos, N. (2003), Scout Robot Motion Model, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2003*, Vol. 1, pp.90-95.
- [32] Stoeter, S., Papanikolopoulos, N. (2005), Autonomous stair-climbing with miniature jumping robots, *Proceedings of IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 35, no. 2, pp. 313-25.
- [33] Shigley, Joseph E. and Charles R. Mischke, (1989). *Mechanical Engineering Design*, Fifth Edition, McGraw-Hill Inc.
- [34] Shigley J. I. and Mischke C. R. (1977). "Standard Handbook of Machine Design." Chap. 43 pp. 43.1 - 43.17 McGraw Hill: New-York, N.Y.
- [35] Wasilewski, R.J. (1975). The shape memory effect in TiNi: One aspect of stress-assisted martensitic transformation. *Proceeding of the International Symposium on Shape Memory Effects and Applications*, edition J. Perkins. Toronto: Plenum Press, pp. 245-271.
- [36] Welch, R., Wilcox, B., and Nasif, A. (1997). Nanorover for Mars, *Space technology* Vol. 17, no. 3-4, May-Jul, pp. 163-172.
- [37] JSC SPEC-SP-R-0022, *General Specification Vacuum Stability Requirements of Polymeric Material for Spacecraft Application*, National Aeronautics and Space Administration (NASA).